

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012

Bc. Petr Dvořák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

**Biometrie posádky vozidla s online přenosem a
vizualizací**

**Biometrics Crew Vehicle with Online
Transmission and Visualization**

2012

Bc. Petr Dvořák

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Petr Dvořák

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3901T009 Biomedicínské inženýrství

Téma:

Biometrie posádky vozidla s online přenosem a vizualizací
Biometrics Crew Vehicle with Online Transmission and Visualization

Zásady pro vypracování:

1. Nastudovat problematiku biometrie posádek motorových vozidel.
2. Seznámení se s problematikou zpracování dat v reálném čase.
3. Návrh mobilního vestavěného systému pro měření pohybu hlavy.
4. Realizace funkčního vzorku navrženého řešení.
5. Testování zhotoveného zařízení.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. HAMILL, J.,- KNUTZEN, K. M. *Biomechanical Basis of Human Movement*. 3. vyd. Philadelphia(USA): Lippincott Williams & Wilkins, 2009. 491 s. ISBN 13: 978-0-7817-9128-1.
2. WHITING, W. C. – RUGG, S. *Dynatomy, Dynamic Human Anatomy*. Champaign (USA), Human Kinetics, 2006. 246s. ISBN: 0-736-3682-2.
3. HARSANYI, G. *Sensors in Biomedical Applications: Fundamentals, Technology and Applications*. 1st ed. Boca Raton(USA): CRC Press LLC, 2000. 368 s. ISBN 1566768853.
4. *Biomedical Sensors*. Edited by Deric Jones. New Jersey: Momentum Press, 2009. 320 s. ISBN 978-1-60650-056-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Vala**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 5.5.12

Duk

.....
Bc. Petr Dvořák

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Davidu Valovi za vstřícnost, cenné rady a hodnotné připomínky k technickému řešení.

Abstrakt

Tématem mé diplomové práce je vytvořit hardware a software, který by byl schopen v reálném čase měřit a zobrazovat změnu polohy hlavy řidiče, či posádky vozidla. Tyto data by měly být dále využitelné například pro návrh bezpečnostních prvků či snímání aktivity a koncentrace řidiče během jízdy.

Klíčová slova

Snímání polohy hlavy, akcelerometr, gyroskop, magnetický senzor, kompas, I²C, TWI

Abstract

Topic of my graduation work is construct hardware and software, that would able to measure and show variation head of driver or other crew of vehicle in real-time. This data should use for example for projection safety elements or for scanning activity and concentration driver during drive.

Key words

Head tracking, akccelerometer, gyroscope, magnetic sensor, compass, I²C, TWI

Seznam použitých symbolů a zkratek

3D	Trojdimenzionální prostor
a [g]	Zrychlení
ACC1X	Osa x akcelerometru v hlavovém modulu
ACC1Y	Osa y akcelerometru v hlavovém modulu
ACC1Z	Osa z akcelerometru v hlavovém modulu
ACC2X	Osa x akcelerometru v modulu umístěním ve vozidle
ACC2Y	Osa y akcelerometru v modulu umístěním ve vozidle
ACC2Z	Osa z akcelerometru v modulu umístěním ve vozidle
ACCX	Osa x akcelerometru
ACCY	Osa y akcelerometru
ACCZ	Osa z akcelerometru
ACK	Acknowledged
ADC	Analog to digital converter
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AVR	Atmega Risc procesor
B [T]	Magnetická indukce
C [F]	Elektrická kapacita
C0	Port C bit 0
C1	Port C bit 1
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COM	Označení sériového portu
d [m]	Vzdálenost, tloušťka
DAC	Digital to analog converter
dd	Kód pro vyjádření formátu data (den)
dps	Degree per sekund
ϵ_0 [F m ⁻¹]	Permitivita vakua
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ϵ_r	Permitivita dielektrika
Fe	Chemická značka železa
FIFO	First In, First Out
FPGA	Field-programmable gate array
g	Gravitační zrychlení ($1g = cca 9,81 \text{ m/s}^2$)
Ge	Chemická značka germánia
GND	Ground (elektrická zem)
GPS	Global Positioning System
GYR1X	Osa x gyroskopu v hlavovém modulu
GYR1Y	Osa y gyroskopu v hlavovém modulu

GYR1Z	Osa z gyroskopu v hlavovém modulu
GYR2X	Osa x gyroskopu v modulu umístěním ve vozidle
GYR2Y	Osa y gyroskopu v modulu umístěním ve vozidle
GYR2Z	Osa z gyroskopu v modulu umístěním ve vozidle
GYRX	Osa x gyroskopu
GYRY	Osa y gyroskopu
GYRZ	Osa z gyroskopu
HgSe	Chemická značka tiemanitu
HgTe	Chemická značka coloradoitu
HH	Kód pro vyjádření formátu času (hodina)
I	Oblast s izotronickou vodivostí
I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
ID	Identifikační číslo paketu
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
InAs	Chemická značka arsenid india
InSb	Chemická značka antimonid india
Ip	Elektrický proud Hallovým senzorem
JTAG	Joint Test Action Group
LSB	Least significant bit
m [kg]	Hmotnost
MAG1X	Osa x kompasu v hlavovém modulu
MAG1Y	Osa y kompasu v hlavovém modulu
MAG1Z	Osa z kompasu v hlavovém modulu
MAGX	Osa x kompasu
MAGY	Osa y kompasu
MAGZ	Osa z kompasu
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MIPS	Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages
mm	Kód pro vyjádření formátu data (měsíc)
MM	Kód pro vyjádření formátu času (minuta)
MSB	Most significant bit
N	Vodivost polovodiče typu N
n+	Vodivost typu N v polovodiči
Ni	Chemická značka niklu
nnp	typ bipolárního transistoru
P	Vodivost polovodiče typu P
p+	Vodivost typu P v polovodiči
PC	Personal computer (osobní počítač)
pnp	Typ bipolárního transistoru
PWM	Pulse width modulation

R	Read
R/W	Read/Write bit
RH	Hallova konstanta
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RoHS	Restriction of the use of Hazardous Substances
rr	Kód pro vyjádření formátu data (rok)
RX	Receive line
SAW	Surface Acoustic Wave
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data Line
Si	Chemická značka křemíku
SPI	Serial Peripheral Interface
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
SRAM	Static Random Access Memory
TQFP	Thin quad flat pack
TWI	Two Wire Interface
TX	Transmit line
u [V]	El. Napětí
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
Ucc [V]	Napájecí napětí
UH [V]	Hallovo napětí
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VA	Volt-Ampérová
W	Write
X	Osa X
Y	Osa Y
Z	Osa Z
ω [°/s (dps)]	Úhlová rychlost
Σ	Značka bytu kontrolního součtu

Obsah

1	Úvod.....	2
1.1	Akcelerometry.....	3
1.1.1	Piezoelektrické akcelerometry	4
1.1.2	Piezoresistivní akcelerometry	5
1.1.3	Tepelné akcelerometry	7
1.1.4	Kapacitní akcelerometry	8
1.1.5	MEMS akcelerometry	9
1.1.6	Freescall Semiconductor MMA8453Q.....	10
1.2	Gyroskopy	11
1.2.1	STMicroelectronics L3G4200D	13
1.2.2	STMicroelectronics LSM330DL.....	14
1.3	Elektronické senzory magnetického pole.....	15
1.3.1	Hallův senzor	15
1.3.2	Magnetoodporový senzor.....	18
1.3.3	Magnetodiodové senzory	19
1.3.4	Magnetotranzistorové (magnistorové) senzory	20
1.3.5	Nosiče doménové – mikrosenzory magnetického pole.....	21
1.3.6	SQID mikrosenzory magnetického pole	21
1.3.7	SAW mikrosenzory magnetického pole.....	22
1.3.8	Porovnání jednotlivých senzorů magnetického pole.....	23
1.3.9	Digitální elektronický kompas Honeywell HMC5883L	23
1.4	Obvody zpracování a komunikační standardy	24
1.4.1	Atmel ATmega16.....	24

1.4.2	I ² C	26
1.4.3	Sériové rozhraní UART a USB	30
2	Návrh měřicího řetězce	31
2.1	Obvody pro měření polohy	32
2.1.1	Obvod s použitím MMA8453Q a L3G4200D	32
2.1.2	Obvod s použitím LSM330DL.....	34
2.1.3	Porovnání obou obvodů	35
2.2	Programování komunikace mezi senzory, mikrokontrolérem a PC	39
2.3	Programování v prostředí MTLAB v PC	43
2.4	Programování v prostředí LABVIEW v PC.....	46
3	Úprava měřicího řetězce	49
3.1	Úprava programu v mikrokontroléru	50
3.2	Úprava programu v LabVIEW	51
3.3	Uspořádání měřících modulů	52
4	Závěr	53
5	Použitá literatura	54

1 Úvod

Zadáním této diplomové práce je navrhnout a uvést v činnost zařízení, které by bylo v reálném čase schopno měřit a zobrazovat pohyb hlavy řidiče vozidla během jízdy. Tato práce bude řešit celkovou problematiku snímání, přenosu a zobrazení dat. Úkolem je vytvořit jak měřicí hardware tak software, které budou zpracovávat naměřená data a v reálném čase zobrazovat je a zapisovat do souboru pro možnost archivace a dalšího zpracování.

Nejprve bude nutno nastudovat možnosti bezkontaktního snímání pohybu a polohy. Z těchto metod vybrat nejvhodnější a najít senzory, které by byly výhodné jak po stránce technických parametrů, tak po stránce finanční. Dále navrhnout a vytvořit měřicí modul, uvážit a zprovoznit vhodnou přenosovou cestu, zvolit vhodný software v PC a naprogramovat aplikaci, která by byla schopna naměřená data vyhodnotit, zobrazit a archivovat.

Nakonec bude mým úkolem celý měřicí řetězec fyzicky sestavit, odladit, navrhnout jeho správné umístění a otestovat jej.

1.1 Akcelerometry

Akcelerometry jsou zařízení k měření polohy, zrychlení, náklonu a vibrací. V principu se jedná o miniaturní elektronický siloměr. Snímače dovolují měření jak statických zrychlení jako například odstředivé zrychlení rotačních součástí nebo gravitační zrychlení, tak dynamických jako například při měření vibrací, změn polohy a rychlosti a jejich následné převedení na elektrický signál, ať už analogový, nebo u vyspělejších senzorů na digitální. Akcelerometry se vyrábí v provedení jednoosých až tříosých, kdy je možno měřit polohu, natočení a pohyb v prostoru.

Mezi nejvýznamnější výrobce těchto zařízení patří STMicroelectronics, Honeywell, ICSensors atd.

Oblast použití akcelerometrů je zejména v těchto okruzích:

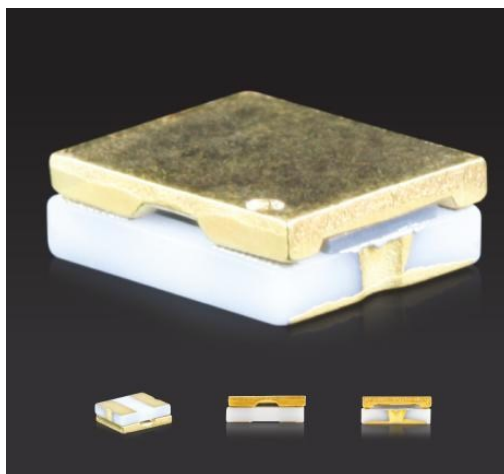
- Automobilový průmysl - senzory pro airbagy, zařízení pro řízení jízdní stability vozidla
- Měření vibrací
- Měření natočení a detekce otáčení
- Přesné měření náklonu s rychlou odezvou
- Měření a detekce pohybu a rychlosti
- Měření a detekce seismické aktivity
- Měření akcelerace
- Měření odstředivé síly a zrychlení
- Navigační systémy
- Zabezpečovací systémy vozidel

Nejběžnější technologie akcelerometrů:

- akcelerometry se seismickou hmotou
 - piezoelektrické akcelerometry (PE)
 - piezoresistivní akcelerometry (PR)
- tepelné akcelerometry (IC)
- kapacitní akcelerometry (VC)
- MEMS akcelerometry

[1] [2]

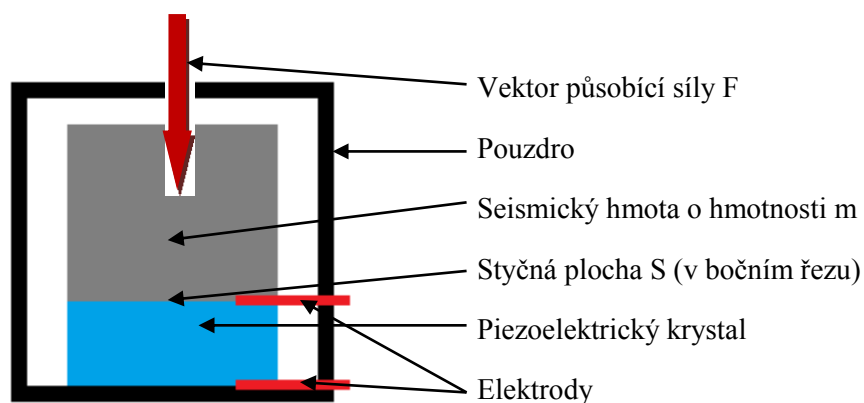
1.1.1 Piezoelektrické akcelerometry



Obrázek 1: Piezoelektrický akcelerometr [3]

Principem piezoelektrického akcelerometru je tlak seismické hmoty na piezoelektrický krystal způsobený vlivem setrvačných sil působících při pohybu akcelerometru na seismickou hmotu, která je k piezoelektrickému krystalu pevně připevněna. Na krystalu jsou napařeny elektrody a je připevněn k pouzdru akcelerometru. Pouzdro dále obsahuje elektroniku, která zpracovává elektrický náboj vzniklý při mechanickém namáhání krystalu na výstupní napětí.

Základní parametry akcelerometrů využívajících piezoelektrický materiál jsou tedy napěťová citlivost a nábojová citlivost.



Obrázek 2: Princip piezoelektrického akcelerometru

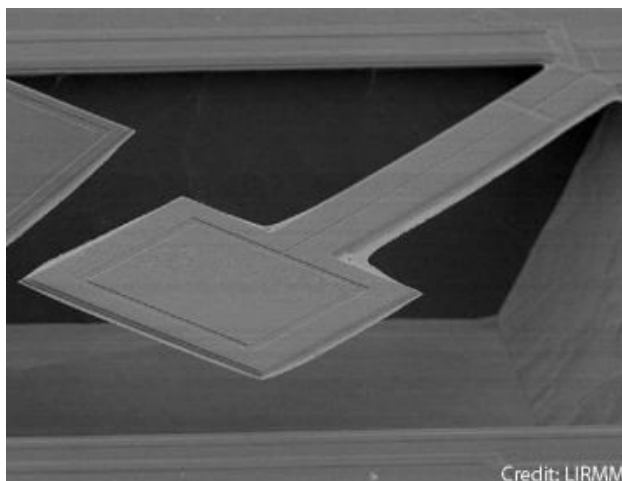
Tyto akcelerometry se konstruují do 3 typů, podle způsobu použití:

- Smykový typ: akcelerometry tohoto typu dosahují lepších výsledků při parazitních vibracích pouzdra, jsou odolnější a pracují ve větším teplotním rozsahu
- Ohybový typ: specializovaná konstrukce pro měření seismické aktivity
- Kompresní typ: základní konstrukce pro průmyslové využití

Výhodou těchto akcelerometrů je snadná výroba a tudíž i cena. Nevýhodou jsou větší rozměry a neschopnost měřit konstantní zrychlení (při konstantním tlaku seismické hmoty piezoelektrický krystal negeneruje žádný el. náboj)

[1] [2]

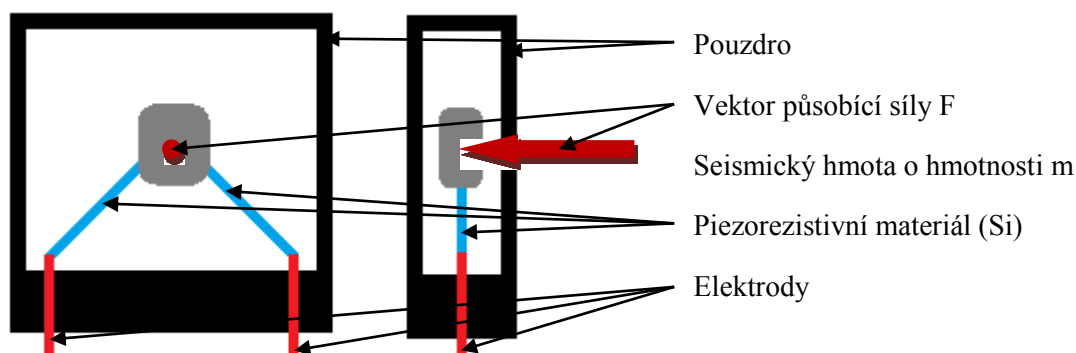
1.1.2 Piezoresistivní akcelerometry



Obrázek 3: Piezoresistivní akcelerometr [4]

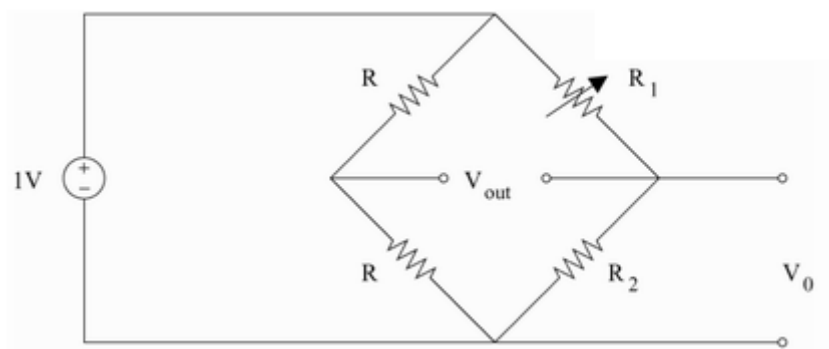
Historie piezoresistivních akcelerometrů sahá až do roku 1979, kdy byl zkonstruován první prototyp.

Hlavním rozdílem mezi piezoresistivními a piezoelektrickými akcelerometry je, že je u piezoresistivního typu použit křemíkový materiál, který při mechanickém namáhání vlivem tlaku seismické hmoty nevytváří elektrický náboj, ale mění svůj elektrický odpor. Vnitřní konstrukci akcelerometru si můžeme představit jako závaží na tenzometru. Když působí síla na akcelerometr, zátěž setrvává v klidu dokud piezorezistor nepředá dostatek energie k pohybu. Síla působící na hmotu je potom přímo úměrná deformaci piezorezistoru.



Obrázek 4: Princip piezorezistivního akcelerometru

Výstupní elektrody snímače jsou zapojeny do Wheatsonova můstku, který je napájen konstantním napětím a změna hodnoty odporu piezorezistivního materiálu vyvolává nevyváženost můstku přímo úměrnou změně hodnoty výstupního napětí V_{out} .

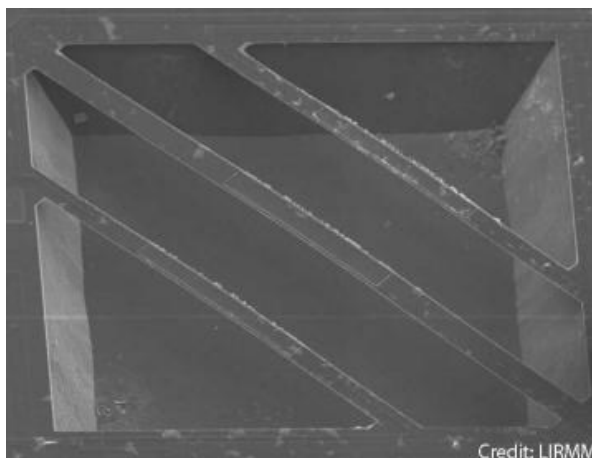


Obrázek 5: Wheatsonův můstek [2]

Výhody piezorezistivních akcelerometrů jsou velká citlivost měření (0,01g), možnost měřit konstantní zrychlení, malá velikost, velká šířka pásma, lineární výstup a nízká cena. Nevýhoda je citlivost na zrychlení v ostatních osách, protože požadujeme citlivost na zrychlení pouze v jednom směru. Tato citlivost se označuje jako křížová citlivost (Cross Sensitivity) a způsobuje chybu měření. Další nevýhodou je velký vliv teploty na měření.

[1] [2]

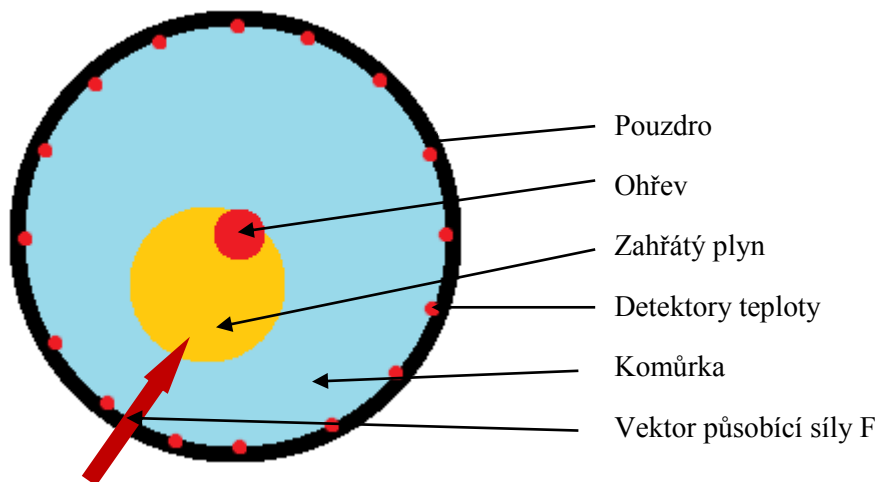
1.1.3 Tepelné akcelerometry



Obrázek 6: Tepelný akcelerometr [4]

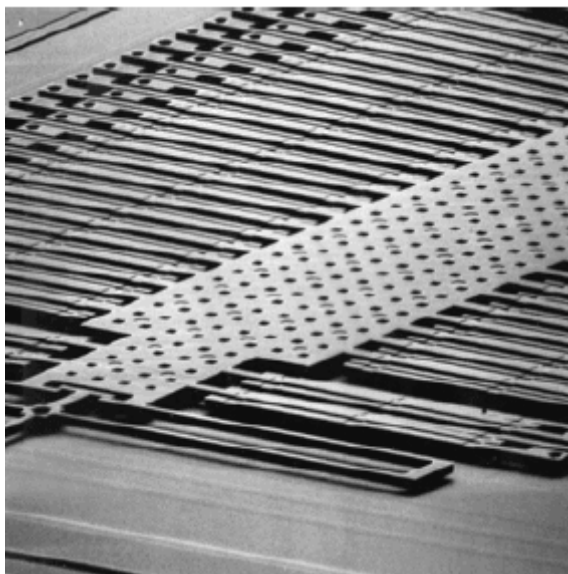
Základní princip tepelných akcelerometrů je obdobný jako u tepelných průtokoměrů. Ve speciální komůrce kulovitého či krychlového tvaru (jednoosé akcelerometry) je v jejím středu ohříván pomocí zdroje tepla plyn. Po okrajích komůrky jsou rovnoměrně rozmístěna tepelná čidla. Během působícího se zrychlení působí na ohřátý plyn uprostřed komůrky setrvačnost, oproti tomu pouzdro komůrky (akcelerometru) je pevně připojeno k zrychlujícímu se objektu, tím vzniká pohyb ohřátého plynu proti směru vektoru zrychlení. Ten je detekován teplotními senzory na stěnách komůrky jako rozdíl teplot na čidlech. Z polohy rozdílu teplot je stanovitelný směr zrychlení a hodnota rozdílu teplot na protilehlých stěnách vyjadřuje velikost zrychlení.

[1] [2]



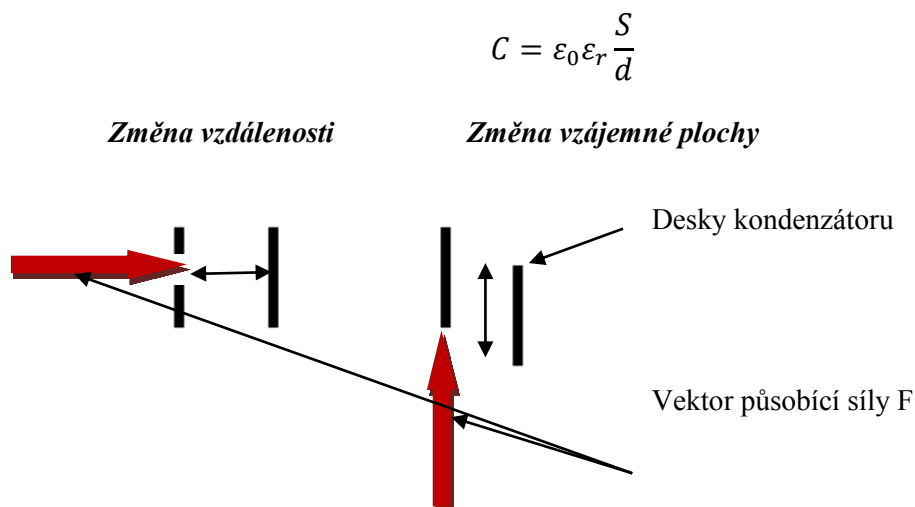
Obrázek 7: Princip tepelného akcelerometru

1.1.4 Kapacitní akcelerometry



Obrázek 8: Kapacitní akcelerometr [5]

Principem kapacitních akcelerometrů je změna kapacity způsobená změnou vzájemné polohy desek kondenzátoru při působení setrvačné síly na jednu z nich. Z následujícího vzorce je patrné, že nejjednodušší co lze měnit, je buď vzdálenost desek d nebo jejich vzájemná plocha S .



Obrázek 9: Princip změny kapacity kondenzátoru

Změna kapacity mezi deskami může být detekována pomocí zesilovače se zpětnovazební měřící kapacitou, kapacitním můstkem nebo oscilátorovými obvody.

[1] [2]

1.1.5 MEMS akcelerometry

MEMS neboli (Micro-Electro-Mechanical Systems) je označení pro velmi sofistikované umístění elektronických, především mikro-elektro-mechanických prvků, na křemíkovou bázi pomocí moderních výrobních metod, které mají svůj původ ve výrobě integrovaných obvodů.

MEMS akcelerometry jsou v podstatě akcelerometry jakékoliv z předešlých typů, které jsou doplněny o MEMS technologii, která má za úkol předzpracování elektrických signálů vzniklých v samotném mechano-elektrickém převodníku a jejich digitalizaci. Jejich výstupy bývají sofistikované sběrnice, jako například SPI, I²C nebo jiné.

[6]

1.1.6 Freescale Semiconductor MMA8453Q



Obrázek 10: Akcelerometr MMA8453Q [7]

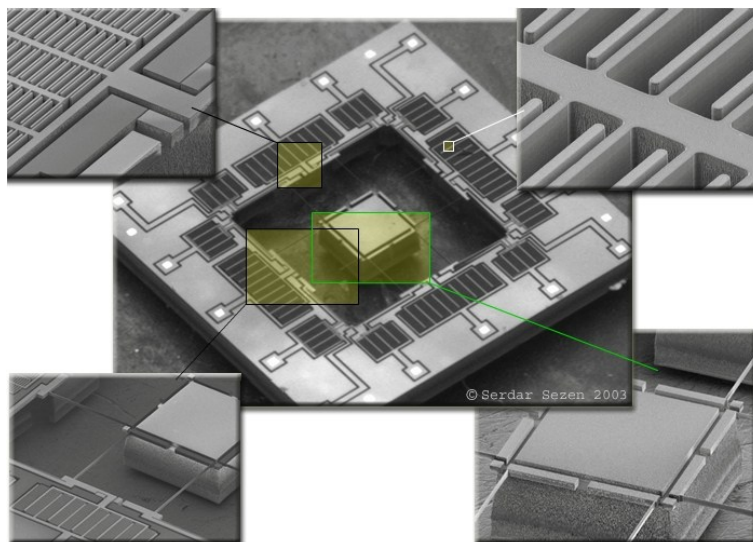
Jedná se o tříosý kapacitní akcelerometr vyráběný firmou Freescale Semiconductor.

Základní parametry:

- Napájecí napětí od 1.95 V do 3.6 V
- Napětí pro rozhraní od 1.6 V do 3.6 V
- Dynamicky nastavitelný rozsah ($\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$)
- Výstupní rychlost přenosu dat od 1.56 Hz do 800 Hz
- Šum $99 \mu g/\sqrt{Hz}$
- Přepínatelný 10-bit nebo 8-bit digitální výstup
- Výstupní rozhraní pomocí sběrnice I²C (do 2.25 MHz s 4.7 k Ω pullup resistorem)
- Dva programovatelné piny přerušení pro šest zdrojů přerušení
- Tři vestavěné kanály detekce pohybu
 - Detekce volného pádu a detekce pohybu: 1 kanál
 - Detekce pulsů: 1 kanál
 - Detekce nárazu: 1 kanál
- Detekce orientace (Portrait/Landscape) s hysteresí
- Automatická změna mezi režimem spánku a probuzení
- Samotestovací mód
- Vyhovuje RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances), což je direktiva zakazující použití nebezpečných látek v elektrických a elektronických výrobcích vydanou Evropskou komisí 27. ledna 2003
- Proudová spotřeba: 6 μA – 165 μA
- Operační teplota od -40 °C do +85 °C

[7]

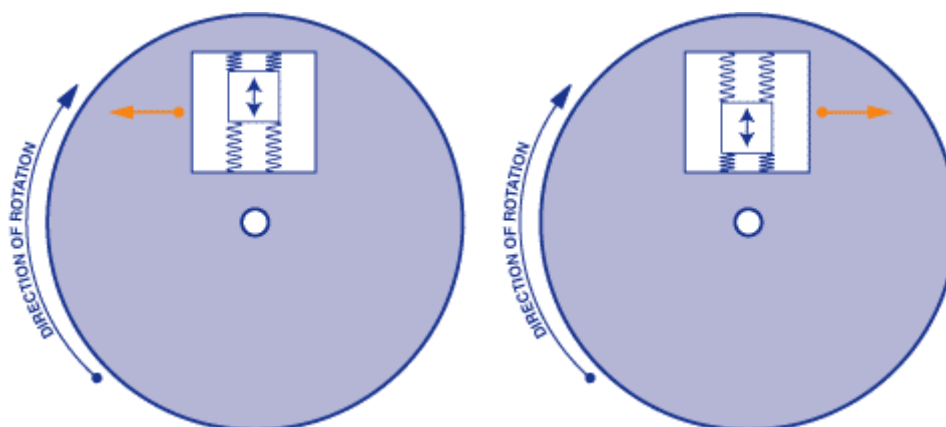
1.2 Gyroskopy



Obrázek 11: MEMS Gyroskop [8]

Vývoj moderních gyroskopů se datuje od 70. let 20. století kdy vznikly potřeby zdokonalovat přesnost dopadu balistických raket. Dnes se gyroskopy nejčastěji využívají v navigaci u letadel a určování pozice přes GPS systémy. Princip měření spočívá v setrvačnicku, který udržuje osu své rotace v inerciálním prostoru. Přesnost gyroskopu je závislá na schopnosti udržení stability jeho otáček. Mohou být také využity ke stabilizaci obrazu ve fotoaparátech, dalekohledech apod. přístrojích. Dříve se gyroskopy skládaly jen z mechanických částí, dnes však obsahují kromě mechanického měřicího systému i vyhodnocovací elektronické obvody a logické systémy. Výstupy můžou být analogové, digitální nebo obojí najednou.

Precizní gyroskopy při regulaci otáček pohonu setrvačnicku využívají i optických snímačů založených na Sagnacově jevu v kruhovém laseru nebo v cívice optického vlákna.



Obrázek 12: Princip gyroskopu [9]

Gyroskopy jsou obecně určené pro měření úhlové rychlosti, tzn. údajů o tom, jak se měřený objekt rychle otáčí, v jednotkách stupňů za sekundu ($^{\circ}/s$, nebo anglicky dps). Rotaci je možné typicky měřit vzhledem k jedné ze tří os z , y , x , někdy označované jako svislá (kolmá) osa (yaw axis), příčná osa (pitch axis) a podélná osa (roll axis).

Použití gyroskopů:

- Detekce a měření rotačního pohybu
- Stabilizační jízdní systémy automobilů
- Zpřesňování pozice systémů GPS
- Stabilizace obrazu a předmětů
- Zjišťování změny polohy, detekce pohybu
- Měření setrvačnosti
- Měření náklonu
- Detekce převrácení, např. automobilu
- Navádění a řízení raket, letadel, robotů apod.
- atd.

Elektronický kapacitní gyroskop je gyroskop, jehož základem je velmi přesně vybroušená keramická krychle, jejíž stěny jsou pokryty mikroskopickými vrstvami kovu vzájemně od sebe izolovaných. Tvoří tak mezi sebou šestipólový keramický kondenzátor. Ten je uložen mezi šest elektrod ve stejné vzdálenosti od kovových vrstev. Jedná se tedy o kombinaci vzduchového a keramického kondenzátoru. Na elektrody je přiveden elektrostatický náboj stejné polarity, který způsobí, že se krychle vycentruje do stejné vzdálenosti od všech elektrod. Působení setrvačnosti na krychli vyvolává změny vzdáleností od jednotlivých elektrod a tím i změnu poměru jednotlivých kapacit. Vyhodnocování naměřených údajů a metody měření ovlivňují celkovou

přesnost měření stejně, jako velikost statického pole, které je omezeno izolační pevností média (vzduchu, inertního plynu, vakua, ale třeba i určitých druhů elektrolytů) a piezoelektrickým jevem, kdy při rozdílech ve velikosti nábojů na jednotlivých elektrodách dochází vlivem změny vzdálenosti.

[1] [2] [9] [10]

1.2.1 STMicroelectronics L3G4200D



Obrázek 13: Gyroskop L3G4200D [11]

Jedná se o tříosý gyroskop technologie CMOS s 10 bitovým datovým výstupem pomocí I²C nebo SPI. Výrobce je STMicroelectronics.

Základní parametry:

- Tři programovatelné rozsahy ($\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps)
- Sběrnice pro datový výstup I²C nebo SPI
- 16 bitový datový výstup
- 8-bititový výstup pro měření teploty
- Dva digitální výstupy (přerušení a připravenost dat)
- Integrovaná nastavitelná pásmová propust
- Vysoká časová a teplotní stabilita
- Napájecí napětí od 2.4 V do 3.6 V
- Nízkonapěťovými vstupy od 1.8 V
- Vestavěný power-down a sleep mód
- Vestavěný teplotní sensor
- Vestavěná paměť typu FIFO
- Vysoká odolnost proti nárazu
- Operační teplota od -40 °C do +85 °C

- Vyhovuje RoHS

[11]

1.2.2 STMicroelectronics LSM330DL



Obrázek 14: STMicroelectronics LSM330DL [12]

Jedná se o tříosý integrovaný gyroskop s akcelerometrem v jednom pouzdru. Použitá technologie je CMOS, výstup je u obou senzorů 16 bitový. Podporuje jak sběrnici I²C tak SPI.

Základní parametry:

- Čtyři programovatelné rozsahy pro gyroskop ($\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps)
- Tři programovatelné rozsahy pro akceleraci ($\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g)
- Sběrnice pro datový výstup I²C nebo SPI
- 16 bitové datové výstupy
- 8-bitový výstup pro měření teploty
- Čtyři digitální výstupy (přerušení a připravenost dat)
- Integrovaná nastavitelná pásmová propust
- Napájecí napětí od 2.4 V do 3.6 V
- Nízkonapětovými vstupy od 1.8 V
- Vestavěný power-down a sleep mód
- Vestavěný teplotní sensor
- Vestavěná paměť typu FIFO
- Operační teplota od -40 °C do +85 °C
- Vyhovuje RoHS

[13]

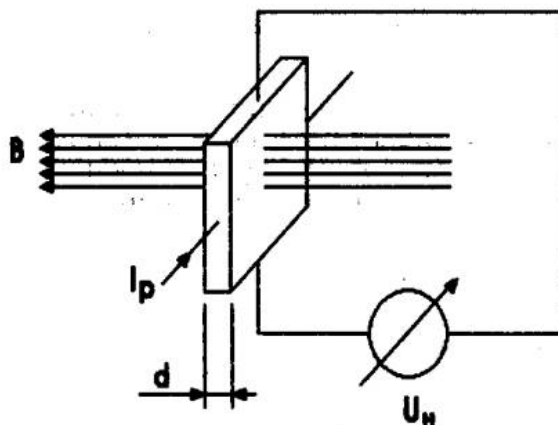
1.3 Elektronické senzory magnetického pole

Senzory magnetického pole:

- Magnetogalvanické
 - Hallovovy sondy
 - Magnetoodpor
 - Magnetodioda
 - Magnetotranzistor
 - Nosičové doménové CMOS
- Akustické
 - SAW magnetoelastické
- Kvantové
 - SQUID

[14]

1.3.1 Hallův senzor



Obrázek 15: Princip Hallova senzoru [34]

Hallův senzor využívá Hallova jevu, kdy příčné magnetické pole s indukcí B působí na destičku polovodiče o tloušťce d , kterou prochází elektrický proud I_p tak, že na protějších stranách hranolu se generuje Hallovo napětí.

pro Hallovo napětí platí:

$$U_H = R_H \cdot \frac{I_p \cdot B}{d}$$

přičemž Hallova konstanta R_H je rovna:

$$R_H = \frac{3}{8 \cdot n_q \cdot q}$$

kde n_q je hustota nosičů náboje a q je elementární náboj.

Hallův senzor lze konstrukčně využít dvěma způsoby. Při prvním způsobu je Hallův senzor pevně připojen v měřicím systému a dochází ke změně magnetické indukce B . Příkladem tohoto konstrukčního řešení jsou wattmetry, kdy měřený proud zátěže protéká pomocnou cívkou, jejíž magnetické pole ovlivňuje Hallův senzor, kterým protéká proud úměrný napětí zátěže. Druhou konstrukční variantou je pohyb Hallova článku v magnetickém poli permanentního magnetu nebo elektromagnetu. Konstrukce se využívají hlavně u snímačů polohy nebo veličin, které lze na snímání polohy převést např. lineárních nebo úhlových výchylek, vibrací, zrychlení, otáček atd.

Pohybujeme-li mechanicky Hallovým článkem v nehomogenním magnetickém poli, Hallovo napětí je závislé na změně polohy tohoto článku. Pro konstantní proud $I_p = konst.$ pak z výše uvedené rovnice vyplývá:

$$U_H = k_1 \cdot f_1(B)$$

kde:

$$k_1 = \frac{R_H \cdot I_p}{d}$$

pro pohyb ve směru osy x platí:

$$B_x = k_2 \cdot f_2(x)$$

pak:

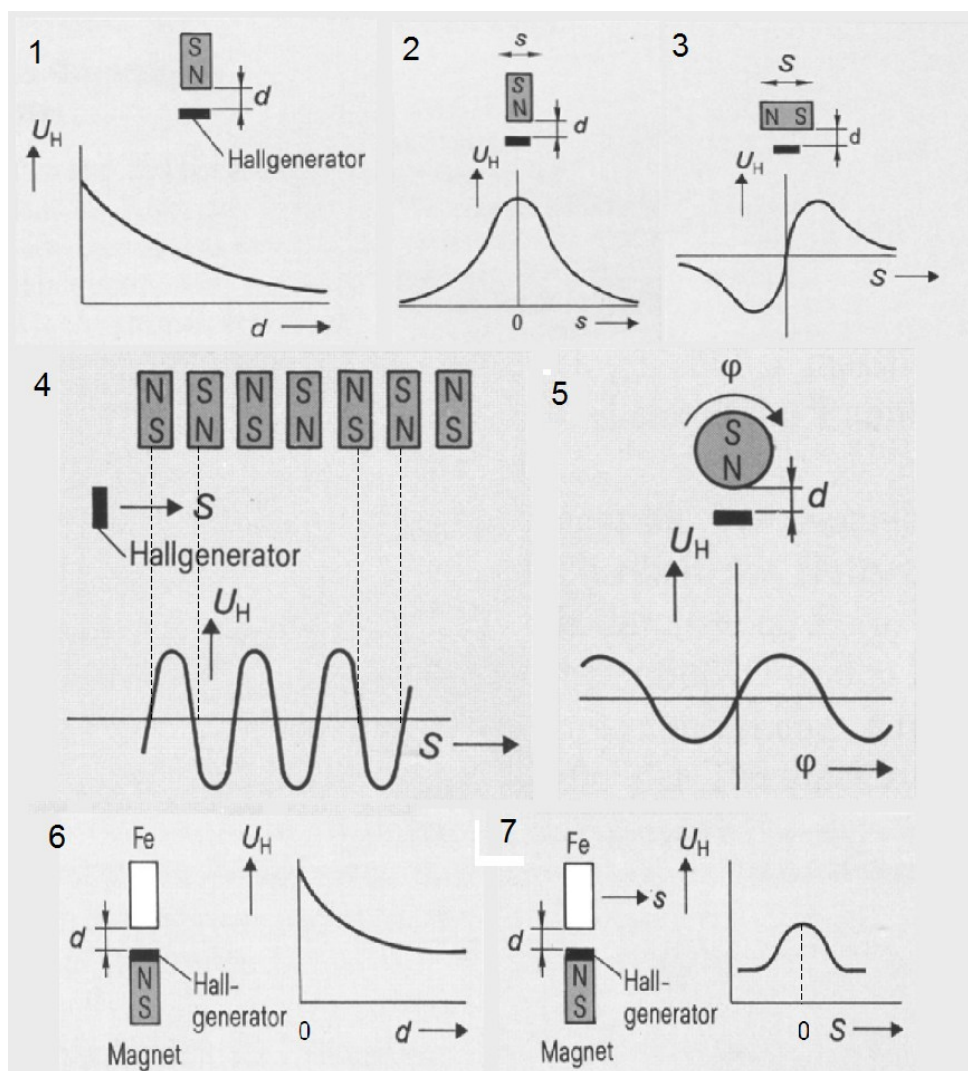
$$U_H = k_3 \cdot f_3(x)$$

U ideálního senzoru polohy by měly být funkce $f_1(B)$, $f_2(x)$ a $f_3(x)$ lineární a gradient magnetického pole co největší a konstantní.

Polovodičové materiály pro snímače jsou: Ge, Si, InAs, InSb, HgTe, HgSe a další.

Následující obrázek zobrazuje příklady měření polohy s Hallovou sondou:

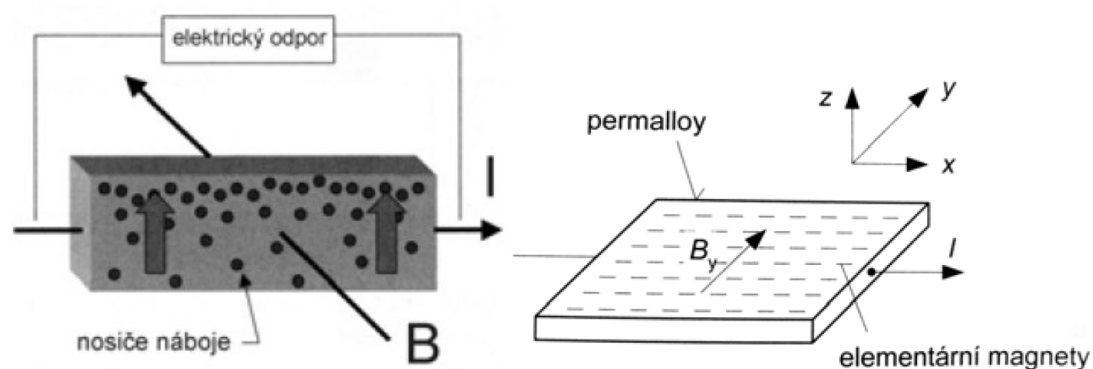
1. Měření vzdálenosti mezi sondou a zdrojem magnetického pole
2. Rovnoběžný posuv
3. Diferenciální posuv, kde dochází ke změně polarity magnetického pole procházejícího sondou
4. Digitální senzor posunutí
5. Senzor natočení – digitální senzor otáček
6. Přiblížení feromagnetika
7. Posuv feromagnetika



Obrázek 16: Princip měření s Hallovou sondou [14]

[14] [15]

1.3.2 Magnetoodporový senzor

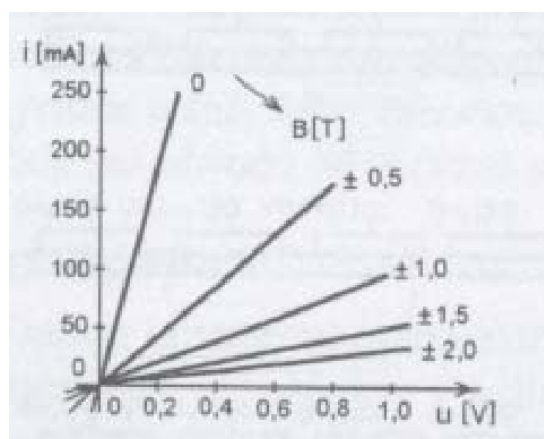


Obrázek 17: Magnetoodporový senzor [14]

Základem jeho funkce je anizotropní magnetoodporový jev, který vzniká v tenkých elektricky vodivých magnetických materiálech. Zde vektor magnetizace vytváří směr, ve kterém teče proud působením vnějšího magnetického pole způsobujícího Lorentzovy síly, čímž dochází ke stáčení magnetizačního vektoru ve vrstvě a tímto i proudové cesty, což vede ve výsledku ke změně odporu vrstvy.

Jako materiál se používá například slitina 81% Ni 19% Fe, polovodič InSb nebo permalloy.

Velkou nevýhodou těchto senzorů je vleká teplotní závislost.

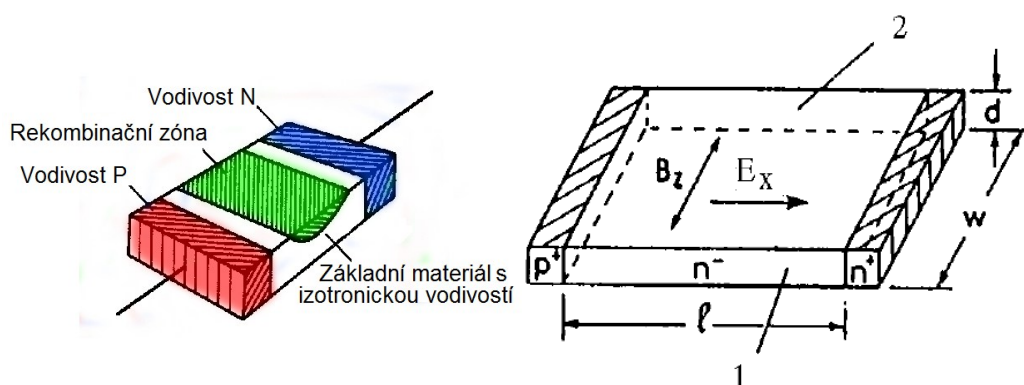


Graf 1: VA charakteristiky magnetoodporu [16]

1.3.3 Magnetodiodové senzory

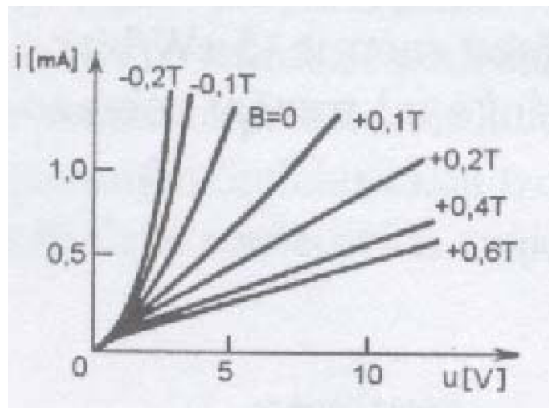
Magnetodiody jsou magneticky citlivé polovodičové součástky, které mění svůj vnitřní odpor v závislosti na vnějším magnetickém poli. Základní strukturu magnetodiody ukazuje obrázek níže. Magnetodioda je tvořena např. z kvádry germania, který má na jednom konci vodivost P a na druhém N. Základní materiál má vlastní (izotronickou) vodivost, přičemž okrajová oblast r je vytvořena takovým způsobem, že se v ní objevuje vyšší počet rekombinací než v samotné oblasti I.

Budou-li nosiče nábojů pohybující se mezi oblastmi P a N vychýleny magnetickým polem vlivem Hallova jevu do oblasti r, nastane větší rekombinace a zvětší se odpor.



Obrázek 18: Magnetodioda [17] [18]

Nosiče jsou injektovány do polovodičové oblasti o rozměrech (ℓ, w, d) u n^+ a p^+ oblastí působením elektrického pole. Díky magnetodiodovému jevu se vytváří rozdíl rekombinací a objevuje se dvojí injekce nosičů. Nosiče jsou odchylovány působením Lorentzovy síly směrem k okrajům označeným 1 a 2, což vede k vytvoření gradientu koncentrace nosičů kolmého k elektrickému poli E_x , následně k modulaci VA charakteristiky diody, ta je závislá na poměrech rekombinací, geometrii a proudovém zatížení.

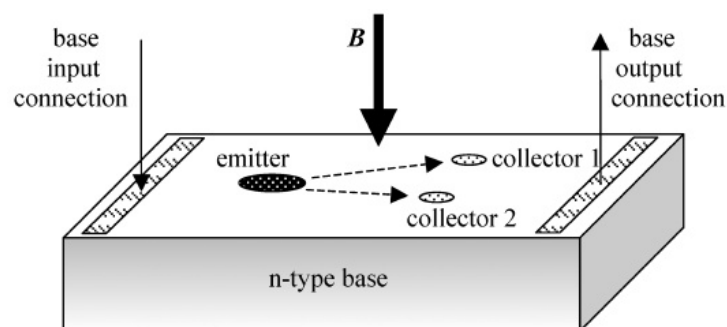


Graf 2: VA charakteristiky magnetodiody [16]

[14] [17]

1.3.4 Magnetotranzistorové (magnistorové) senzory

Skládá se z proudového zdroje – emitoru a několika kolektorů.



Obrázek 19: Magnetotranzistor [19]

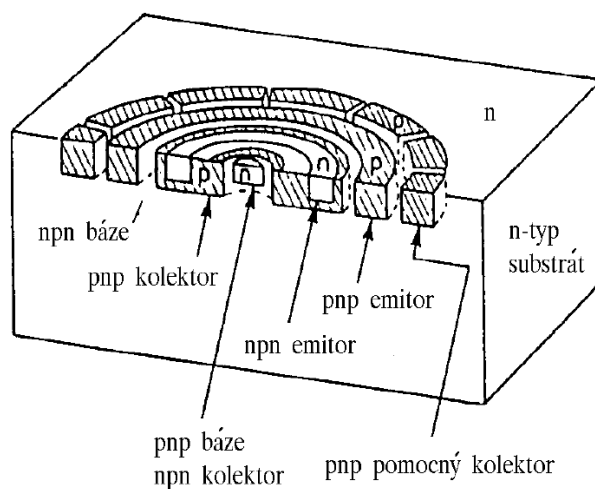
Využívají se dva principy činnosti:

1. Nosiče náboje jsou odchylovány Lorenzovou silou vzniklou působením magnetického pole – vznik nerovnováhy kolektorového proudu
2. Modulace emitorové injekce (Hallovo napětí v bázi moduluje pomocí emitoru proudovou injekci jako u magnetodiod)

Rozdělení dle směru magnetického toku

1. Laterální – citlivost na kolmé magnetické pole
2. Vertikální – citlivost na laterální magnetické pole

1.3.5 Nosiče doménové – mikrosenzory magnetického pole

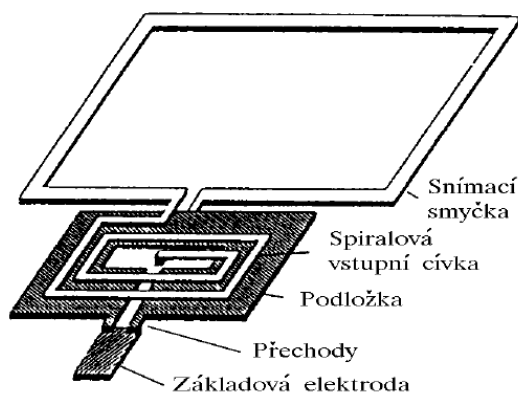


Obrázek 20: Doménové nosiče [14]

Jde vlastně o mnohonásobnou kruhovou strukturu npnp. V centrální části se nacházejí kruhové vertikální npn a laterální pnp tranzistory. Vodivosti typu p na vnějšku fungují jako přídavné kolektory laterálních npn tranzistorů a detekují rotaci proudové domény. Proud působí v malé doméně, která rotuje při přítomnosti magnetického pole vyššího než prahové. Výstup je silně teplotně závislý s velkou proudovou citlivostí až 3 mA/T.

[14]

1.3.6 SQUID mikrosenzory magnetického pole



Obrázek 21: SQUID mikrosenzor magnetického pole [14]

SQUID neboli supravodivé kvantové interferenční zařízení je využíváno k měření velmi malých magnetických polí až na hranici řádu femto.

Základním kamenem pro sestavení tohoto zařízení bylo objevení Josephsonova jevu v roce 1962. Tento jev je založen na přechodu supravodič-izolace-supravodič, kde lze díky kvantovému tunelování Copperových párů měřit velmi malé rozdíly napětí.

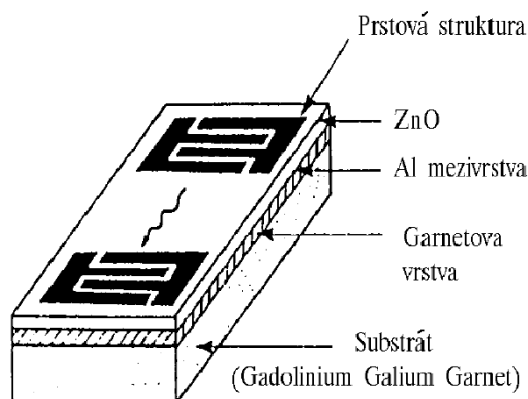
Standardně je jako hlavní složka zařízení použit niob ochlazený pomocí tekutého hélia, což je nejpřesnější ale cenově velmi náročné. V dnešní době je možno využít nových slitin, například $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, za použití tekutého dusíku jako chladiva. Tato metoda je ekonomičtější, avšak je vhodná pouze pro aplikace vyžadující menší přesnost.

Hlavní částí senzoru je supravodivá snímací smyčka fungující jako „anténa“, z té je signál přiveden na spirálovou vstupní smyčku, přes kterou pokračuje na Josephsonovy přechody. Ty jsou tvořeny vrstvou izolantu tenčí než mikrometr, jež se chovají jako tunelová dioda. Zde dochází k interferenci proudů v jednotlivých oddělených subsmyčkách, oscilaci a sčítání jejich proudů.

Mezi hlavní využití SQUID patří lékařství, kde se zaznamenávají například mozkové signály, které vyvolávají magnetická pole v řádech T a jsou zde tedy nutné ty nejpřesnější přístroje. Další využití se nachází v geologii, při průzkumu ložisek materiálu a v mnoha dalších oblastech.

[14] [20] [21]

1.3.7 SAW mikrosenzory magnetického pole



Obrázek 22: SAW mikrosenzor magnetického pole [14]

Působením magnetické indukce na tenkou vrstvu, kterou se šíří povrchová akustická vlna, dochází k modulaci akustických parametrů magnetoelastického materiálu.

[14]

1.3.8 Porovnání jednotlivých senzorů magnetického pole

Typ mikrosenzoru	Rozsah [T]	Citlivost
Hallova sonda	$10^{-3} - 10^{-9}$	500 – 700 %/T
Magnetoodpor	$10^{-1} - 10^{-10}$	5 – 25 V/T
Magnetodioda	10^{-3}	0.5 – 5%/T
Magnetotranzistor	10^{-3}	
Doménové nosiče		100 kHz/T
SQID	$10^{-6} - 10^{-14}$	

[14]

1.3.9 Digitální elektronický kompas Honeywell HMC5883L



Obrázek 23: Digitální kompas HMC5883L [22]

Jedná se o tříosý senzor magnetického pole, je založený na magnetoodporovém principu. Výstup je 12 bitový, přes sběrnici I²C. Výrobce je firma Honeywell.

Základní parametry:

- Osm programovatelných rozsahů ($\pm 0,88/\pm 1,3/\pm 1,9/\pm 2,5/\pm 4,0/\pm 4,7/\pm 5,6/\pm 8,1$ gaussů)
- Sběrnice I²C
- 12 bitový datový výstup
- Jeden digitální výstup pro přerušení
- Napájecí napětí od 2,16 V do 3,6 V
- Vyhovuje RoHS

[22]

1.4 Obvody zpracování a komunikační standardy

1.4.1 Atmel ATmega16



Obrázek 24: Atmel ATmega16 [23]

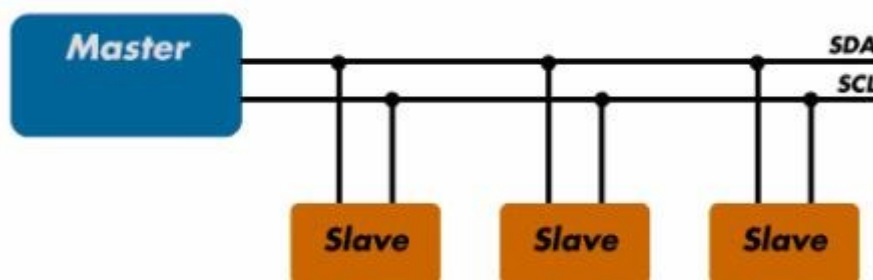
Základní parametry:

- Vysoce výkonný, nízko-příkonový Atmel® AVR® 8-bit Mikrokontrolér
- Pokročilá architektura RISC
 - 131 Instrukcí pro hospodárné využití výpočetního cyklu
 - 32×8 obecných pracovních registrů
 - Plně statické operace
 - Propustnost až 16 MIPS při 16 MHz
 - Vestavěný dvoutaktní multiplikátor
- Vysoce stálé paměťové segmenty
 - 16 KB Flash programové paměti
 - 512 Bytů EEPROM
 - 1 KB interní SRAM
 - Počet cyklů čtení/zápis: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Doba uchování dat: 20 let při 85°C/100 let při t 25°C
 - Volitelný zámek zavádění kódu
 - Funkce uzamčení programování pro ochranu software
- JTAG (vyhovující IEEE 1149.1) rozhraní
 - Boundary-scan v souladu s JTAG standardy
 - Podpora rozsáhlého debugování na čipu
 - Programování Flash, EEPROM, pojistek and zamykacích bitů pomocí JTAG rozhraní
- Periferní funkce
 - Dva 8-bitový časovače/čítače se samostatným módem přetečení a porovnávání

- Jeden 16-bitový časovač/čítač se samostatným módem přetečení, porovnávání a záchytu
- Čítač v reálném čase s odděleným oscilátorem
- Čtyři PWM kanály
- 8-kanálové, 10-bitové dvouvodičové sériové ADC rozhraní
- Two-wire sériové rozhraní (TWI), neboli I²C
- Programovatelné sériové rozhraní USART
- Master/Slave SPI sériové rozhraní
- Programovatelný Watchdog s vlastním vestavěným oscilátorem
- Vestavěný analogový komparátor
- Speciální vlastnosti mikrokontroléru
 - Power-on Reset a programovatelná Brown-out detekce
 - Vnitřní kalibrovatelný RC oscilátor
 - Externí a interní zdroje přerušení
 - Šest klidových módů: Čekání, redukce šumu ADC, Úspora energie, Vypnutí, Pohotovost a rozšířená pohotovost
- Vstupy/výstupy a pouzdro
 - 32 programovatelných I/O linek
 - 40-pinové PDIP, 44- pinové TQFP a 44- pinové QFN/MLF
- Provozní napětí
 - 2.7V - 5.5V pro ATmega16L
 - 4.5V - 5.5V pro ATmega16
- Rychlost jádra
 - 0 - 8 MHz pro ATmega16L
 - 0 - 16 MHz pro ATmega16
- Spotřeba energie při 1 MHz, 3V a 25°C pro ATmega16L
 - Aktivní: 1.1 mA
 - Vyčkávací režim: 0.35 mA
 - Mód vypnutí: < 1 µA

[24] [25]

1.4.2 I²C



Obrázek 25: Příklad zapojení zařízení po sběrnici I²C [25]

I²C (anglicky Inter-Integrated Circuit, čteme I-kvadrát-C, nebo nesprávně I-dva-C) je sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips. Je využívána v mobilních telefonech, základních deskách počítačů nebo při komunikaci mikrokontrolérů se smart sensory.

1.4.2.1 Komunikace po sériové sběrnici I²C

Základem sběrnice I²C jsou dva vodiče, z čehož vychází i její pojmenování používané firmou Atmel a to Two-wire serial interface (TWI). Sběrnice se skládá z vodiče SCL (Serial Clock Line) a SDA (Serial Data Line). Pomocí SCL posílá jedinečné zařízení master všem ostatním zařízením synchronizační hodinový signál, SDA slouží jako poloduplexní sériový datový vodič. V praxi je potřeba ještě vodič GND – signálová zem. Vodiče SDA a SCL jsou konstruované jako otevřené, proto je potřeba je připojit přes Pull-Up rezistor (cca 1 k Ω až 1,5 k Ω) k napájecímu napětí U_{cc} .

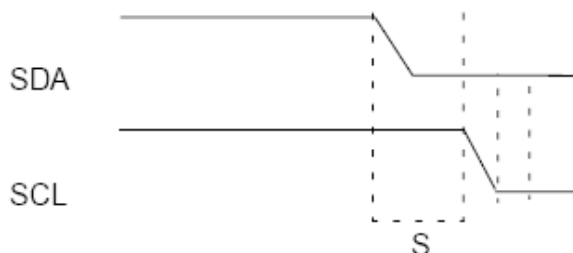
Pull-Up rezistory mají za účel udržet normou stanovený klidový stav logická 1 na sběrnici i v případě odpojení jednotlivých uzlů či jejich přepnutí do stavu nízké spotřeby.

1.4.2.2 Řízení sběrnice zařízením typu master

Veškerá komunikace na sběrnici je řízena zařízením stanoveným jako master, to vysílá hodinový signál SCL a zahajuje jakoukoli komunikaci. Zařízení typu slave mohou jen naslouchat. Vysílat data mohou až po vyzvání zařízením master. Jedinou cestou, jak vyvolat komunikaci se zařízením slave je připojení dalších vodičů k masteru, které vyvolají přerušení a následnou komunikaci ze strany masteru.

Vlastní komunikace je zahájena tak, že master sníží úroveň na datovém vodiči SDA na logickou nulu, zatímco SCL si po určitou dobu udržuje stav logické jedničky (tato doba je závislá na zvolené přenosové rychlosti). Tento stav se označuje termínem start bit, ten zaznamenají všechny uzly připojené na sběrnici. Ihned po vyslání start bitu začne master vysílat adresu uzlu,

se kterým si přeje komunikovat (sedmibitová či speciálně kódovaná desetibitová adresa) a také bit, jehož stavem se určuje, zda má komunikující uzel data vysílat či naopak přijímat. Každý bit (ať už je na sběrnici zapisován jakýmkoli zařízením) musí mít ustálenou hodnotu ve chvíli, kdy hodinový signál přejde ze stavu logické nuly do stavu logické jedničky (náběžná hrana).



Obrázek 26: Zahájení přenosu dat – vyslání start bitu [25]

1.4.2.3 Adresování uzlů připojených na sběrnici

Každému zařízení typu slave musí být přiřazena unikátní sedmi nebo deseti bitová adresa. Adresa jednotlivých zařízení je buď pevně daná výrobcem nebo lze zcela či z části měnit.

V případě sedmi bitové adresy, je teoreticky možno adresovat až $2^7 = 128$ zařízení, v praxi o něco méně, kvůli několika vyhrazeným adresám (tzv. general call addresses) pro zvláštní účely, jako například adresa 0000000 pro broadcast.

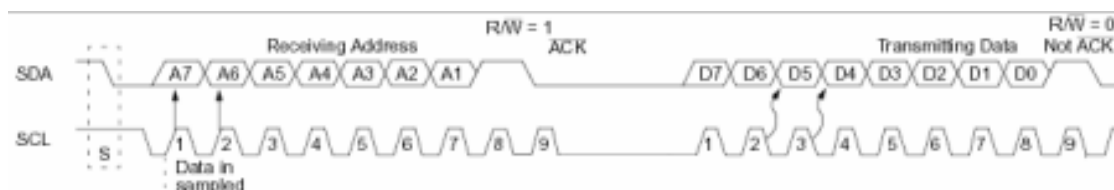
Sedmi bitová adresa je přenášena v rámci jednoho bytu, prvních 7 bitů je adresa, poslední bit je tzv. R/W a určuje, zda adresované zařízení bude vysílat či číst data.



Obrázek 27: Komunikace probíhající na sběrnici I²C (7 bitová adresa) [23]

V případě, že nepostačuje sedmi bitová adresa je možnost použít adresování deseti bitové, kterým je možno adresovat skoro $2^{10} = 1024$ koncových zařízení. Použití desetibitové adresy přináší i svá úskalí a to jak dvoj až trojnásobný čas pro adresaci každého zařízení, tak i nebezpečí nekompatibility některých starších nebo jednodušších zařízení, které nepodporují tento standard.

1.4.2.4 Použití sedmibitové adresy



Obrázek 28: Průběh komunikace při adresování uzlů pomocí sedmibitové adresy [25]

Komunikace je zahájena start bitem, tj. přechodem signálu SDA z klidového stavu představovaného úrovní logické jedničky na datovém i hodinovém vodiči na úroveň logické nuly. Ihned po start bitu je možné zahájit přenos adresy. Zařízení master vyšle na sběrnici všech sedm bitů adresy, přičemž vždy při náběžné hraně hodinového signálu je již logická hodnota adresního bitu ustálena, takže ji mohou přečíst všechna zařízení typu slave. Poslední bit – osmý – určuje, zda se mají data z cílového zařízení vysílat, či naopak zda má toto zařízení data přijímat (logická úroveň 0 značí čtení, jednička pak zápis). Po přenosu všech osmi bitů (sedm bitů adresy + osmý bit s určením směru přenosu dat) provede každý uzel slave porovnání přijaté adresy se svojí vlastní adresou. Vybraný uzel (jen on) totiž musí potvrdit, že se na sběrnici skutečně nachází. Potvrzení (bit ACK – acknowledge) se v devátém cyklu hodin pošle zpět na zařízení typu master. Příjem logické nuly značí, že adresovaný uzel skutečně existuje a je možné s ním zahájit komunikaci. Logická jednička naopak může znamenat, že uzel s danou adresou buď neexistuje nebo je z nějakého důvodu odpojen či prostě není z různých příčin připraven komunikovat.

1.4.2.5 Použití desetibitové adresy

Desetibitová adresace se provádí pomocí dvou bytů, jako první je po start bitu odeslán byte o struktuře 11110??0 (jeden z general call addresses), kde otazníky značí devátý a desátý bit adresy, nula na konci znamená, že se jedná o režim čtení aby bylo možno úspěšně odeslat i druhý adresovací byte obsahující první až osmý bit adresy. Po vyslání této adresy je zařízení slave schopno jen číst data. V případě potřeby čtení dat ze slave zařízení je zapotřebí vyslat další start bit, po kterém následuje opět první byte adresy. Jelikož si první dva byty zařízení zapamatovalo, je dokončena adresace pro příjem dat do masteru.

Za adresou následuje osm datových bitů a devátý bit ACK, kterým slave potvrzuje příjem.



Obrázek 29: Průběh komunikace při adresování uzlů pomocí desetibitové adresy (příjem dat zařízením typu slave [25])



Obrázek 30: Průběh komunikace při adresování uzlů pomocí desetibitové adresy (vysílání dat zařízením typu slave po jeho výběru) [25]

1.4.2.6 Standardní přenosové rychlosti

Standardní přenosové rychlosti jsou od 10 kb/s do 400 kb/s, někdy také označované jako 10 kHz a 400 kHz. Reálná rychlost je o něco nižší, protože je zde započítán i ACK bit. Vyšší rychlosti jsou zatím používány jen ojediněle a nejsou zatím součástí standardu, většina zařízení s nimi také ještě neumí pracovat, protože kladou vysoké nároky na obvody obsluhy sběrnice.

Přenosová rychlost	Označení
10 kbps	low speed mode
100 kbps	standard mode
400 kbps	fast mode
1 Mbps	fast mode +
3,4 Mbps	high speed mode

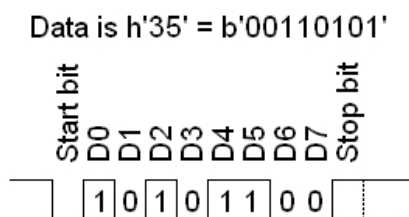
Tabulka 1: Přehled používaných rychlostí u sběrnice I²C [25]

[25] [26] [27]

1.4.3 Sériové rozhraní UART a USB

1.4.3.1 UART

UART je plně-duplexní asynchronní 8 bitové sériové rozhraní. UART vysílá data na pinu označovaném obvykle jako Tx (transmit), přijímá na pinu Rx (receive). Klidová úroveň signálu je log. 1 (pokud neprobíhá vysílání ani příjem). Vysílání je zahájeno změnou hodnoty signálu na log. 0 po dobu jednoho bitu (tzv. start-bit). Následovně se posílá nejnižší datový bit, poslední nejvýznamnější datový bit je následován stop bitem, který má opět úroveň log. 1. Po odvysílání stop-bitu může začít přenos dalšího bajtu. Na obrázku je to vyznačeno tečkovaně.



Obrázek 31: Příklad přenosu bitu po sběrnici UART [28]

Nejčastěji používané přenosové rychlosti jsou 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 57600 a 115200 bit/s.

1.4.3.2 USB

USB (Universal Serial Bus) je univerzální sériová sběrnice, moderní způsob připojení periférií k počítači. Nahrazuje dříve používané způsoby připojení (sériový a paralelní port, PS/2, Gameport apod.).

Fyzické zapojení je praktikováno čtyřmi vodiči a to dvěma datovými DATA+, DATA-, napájením +5 V a zemnicím vodičem GND.

USB sběrnice zatím prošla třemi vývojovými etapami označovanými jako USB 1.1 (1,5 až 12 Mbit/s), USB 2.0 (480 Mbit/s) a USB 3.0 (až 5 Gbit/s) u kterého je použita technologie osmi vodičů namísto původních čtyř. USB 1.1 a USB 2.0 jsou u většiny přístrojů plně kompatibilní.

Celkem je možno na sběrnici adresovat až 127 zařízení, maximální délka mezi stanicemi je 5 m a maximální proudové zatížení je 100 mA, to je však dnes u většiny počítačů upraveno změnou napájení přímo z hlavního zdroje.

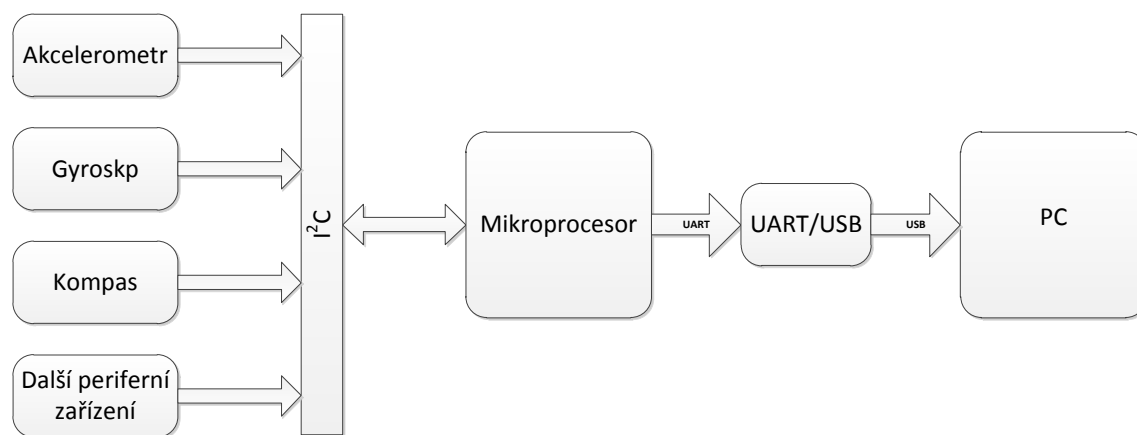
USB je sběrnice jen s jedním zařízením typu Master, tj. všechny aktivity vycházejí z PC. Data se vysílají v krátkých paketech o 8 bajtech a delších paketech o délce až 256 bajtů. PC může požadovat data od zařízení, naopak žádné zařízení nemůže vysílat data samo od sebe.

[28] [30] [29]

2 Návrh měřicího řetězce

Úkolem je měřit a zobrazit v reálném čase polohu hlavy řidiče automobilu za účelem zjištění směru pohledu, namáhání krční páteře a případně pro zjišťování pohybů hlavy při nehodě. Tyto data mohou být dále využity pro zlepšení ergonomie ovládacích přístrojů a indikátorů, návrh bezpečnostních prvků či zařízení pro zjišťování bdělosti řidiče vozidla.

Měřicí řetězec bude součástí složitějšího komplexního měřicího systému, který bude monitorovat různé biotelemetrické údaje. Samotný řetězec se skládá ze dvou samostatných zařízení, každé zařízení obsahuje tři snímače polohy – akcelerometr, gyroskop a elektronický digitální kompas, dále pak mikrokontrolér ATmega16 a převodník sériového rozhraní UART na USB. Tyto dvě identické měřicí stanice budou pomocí sběrnice USB připojeny k PC na palubě vozidla, to bude v mém řešení zastávat funkci budoucího komplexního vyhodnocovacího a přenosového systému, na vývoji tohoto systému spolupracuje více projektů a není úkolem mého zadání.



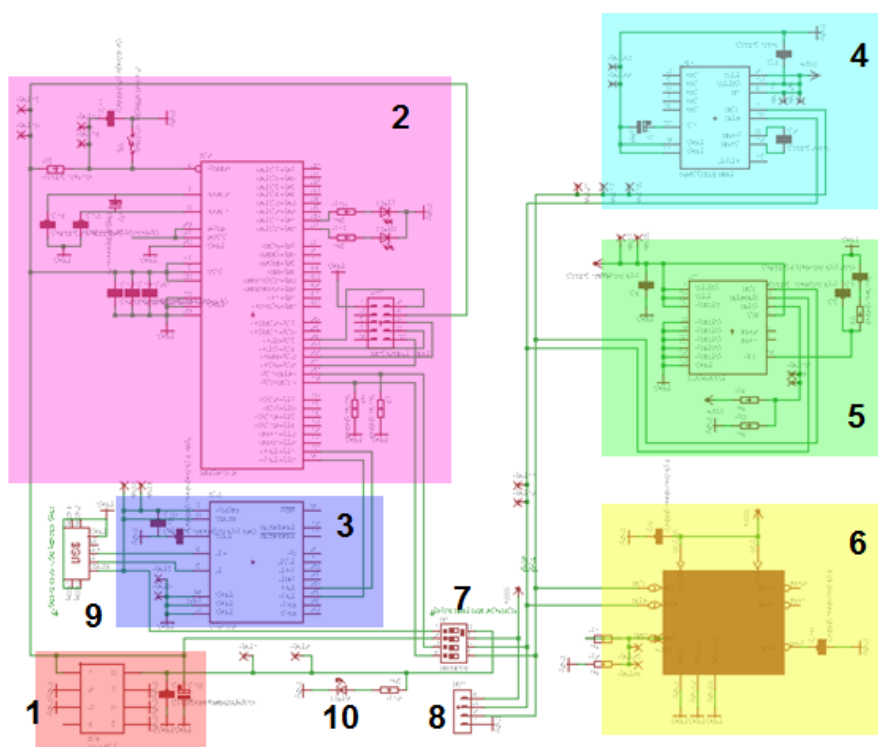
Obrázek 32: Blokové schéma měřicího řetězce

2.1 Obvody pro měření polohy

Jako obvody pro měření polohy byly vybrány miniaturní integrované snímače komunikující po sběrnici I²C. Je jím 10 bitový tříosý akcelerometr firmy Freescale Semiconductor MMA8453Q, 16 bitový tříosý gyroskop STMicroelectronics L3G4200D a 12bitový tříosý senzor magnetického pole Honeywell HMC5883L. Dále je zvažována možnost použití 16 bitového senzoru STMicroelectronics LSM330DL, jako náhrada za obvody MMA8453Q a L3G4200D. Tento obvod je tříosý akcelerometr v jednom pouzdře s tříosým gyroskopem. Tyto senzory byly vybrány hlavně pro svou miniaturní velikost, malý odběr a kompatibilitu se sběrnici I2C, která byla vybrána jako komunikační prostředek mezi jednotlivými senzory a řídicím mikroprocesorem.

2.1.1 Obvod s použitím MMA8453Q a L3G4200D

Měřicí obvod byl navržen zejména podle výrobci doporučených schémat zapojení v technické dokumentaci k těmto přístrojům. Jako napájení bylo vybráno napětí 3,3 V, které je kompatibilní pro všechna použitá zařízení.

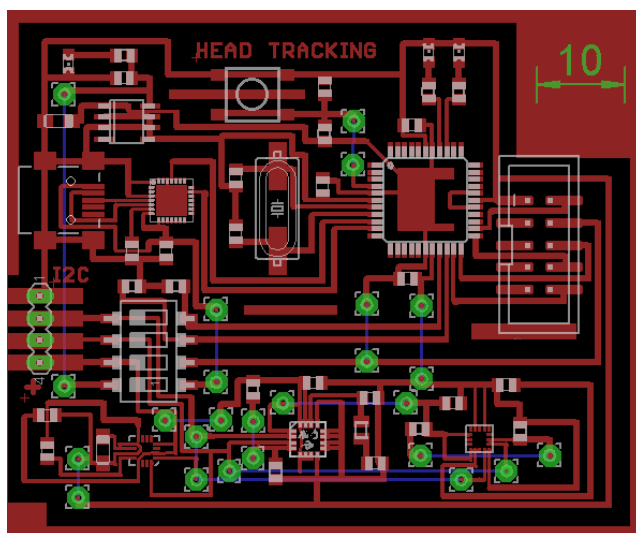


Obrázek 33: Schéma měřicího obvodu s použitím senzorů MMA8453Q a L3G4200D

Obvod se skládá z těchto hlavních bloků:

1. Integrovaný stabilizovaný zdroj LE33CD
2. Mikrokontroler ATMEGA16
3. Převodník UART/USB CP2102
4. Senzor magnetického pole HMC5883L
5. MEMS gyroskop L3G4200D
6. MEMS akcelerometr MMA8453Q
7. Vypínače celkového napájení a sběrnice I²C
8. Pin pro připojení dalších senzorů pomocí I²C
9. USB konektor typu MiniB
10. LED dioda indikující připojení napájecího napětí

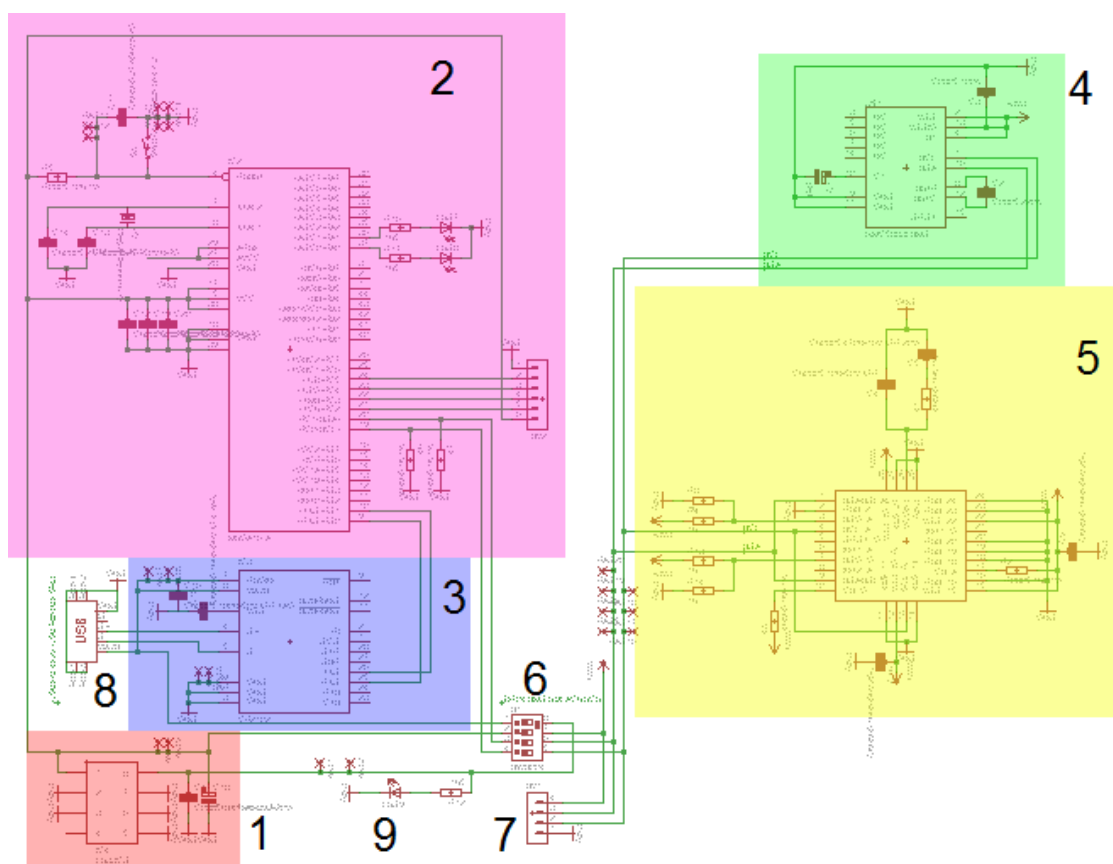
Senzory HMC5883L, L3G4200D a MMA8453Q jsou připojeny k mikrokontroleru ATMEGA16 pomocí sběrnice I²C, která je tvořena dvěma pull-up rezistory o hodnotě 1 k Ω , ta je dle technických upozornění na stránkách firmy STMicroelectronics nejvhodnější pro napájení sběrnice 3,3 V, malé proudové zatížení a sdruženou kapacitu mezi SCL a SDA vodiči do 400 pF. Zdrojem napájení je 5 V se sběrnice USB, to je využito pro napájení převodníku CP2102 a stabilizátoru LE33CD, který napájí senzory a mikrokontrolér. K programování mikrokontroleru je použito programátoru JTAG ICE s napájením sběrnice USB, takže je na napájecí cestu mikrokontroleru instalovaná vypínač, kterým je nutné před připojením programátoru odpojit sběrnici I²C od napájení, protože maximální doporučené napětí pro k ní připojené senzory je 3,6 V. Jako spojení s PC byl pro své rozměry a velkou rozšířenost použit konektor USB typu B mini.



Obrázek 34: Obraz DPS s použitím MMA8453Q a L3G4200D

2.1.2 Obvod s použitím LSM330DL

Z důvodů nedostupnosti senzorů MMA8453Q a L3G4200D u dodavatele byla nutnost vybrat jiný adekvátní senzor, který by byl v schůdném čase k dodání. Jako nejvhodnější se podle nabídky firmy Fanell ukázal senzor STMicroelectronics LSM330DL, jehož výhodou je zabudování jak akcelerometru tak gyroskopu do jednoho pouzdra, dále 16 bitový výstup obou senzorů a přitažlivá cena. Zvláštností tohoto senzoru je koncepce, ve které jsou oba senzory zastavěny jakoby separátně, mají vyvedené každý své vlastní napájení i komunikační porty SCL a SDA. Tyto obvody mají i vlastní adresy.

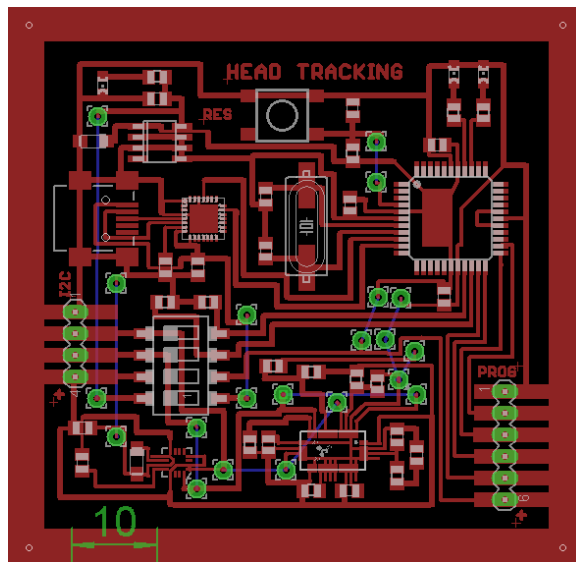


Obrázek 35: Schéma měřicího obvodu s použitím senzorů LSM330DL

Obvod se skládá z těchto hlavních bloků:

1. Integrovaný stabilizovaný zdroj LE33CD
2. Mikrokontroler ATMEGA16
3. Převodník UART/USB CP2102
4. Senzor magnetického pole HMC5883L

5. MEMS gyroskop a akcelerometr LSM330DL
6. Vypínače celkového napájení a sběrnice I²C
7. Pin pro připojení dalších senzorů pomocí I²C
8. USB konektor typu MiniB
9. LED dioda indikující připojení napájecího napětí



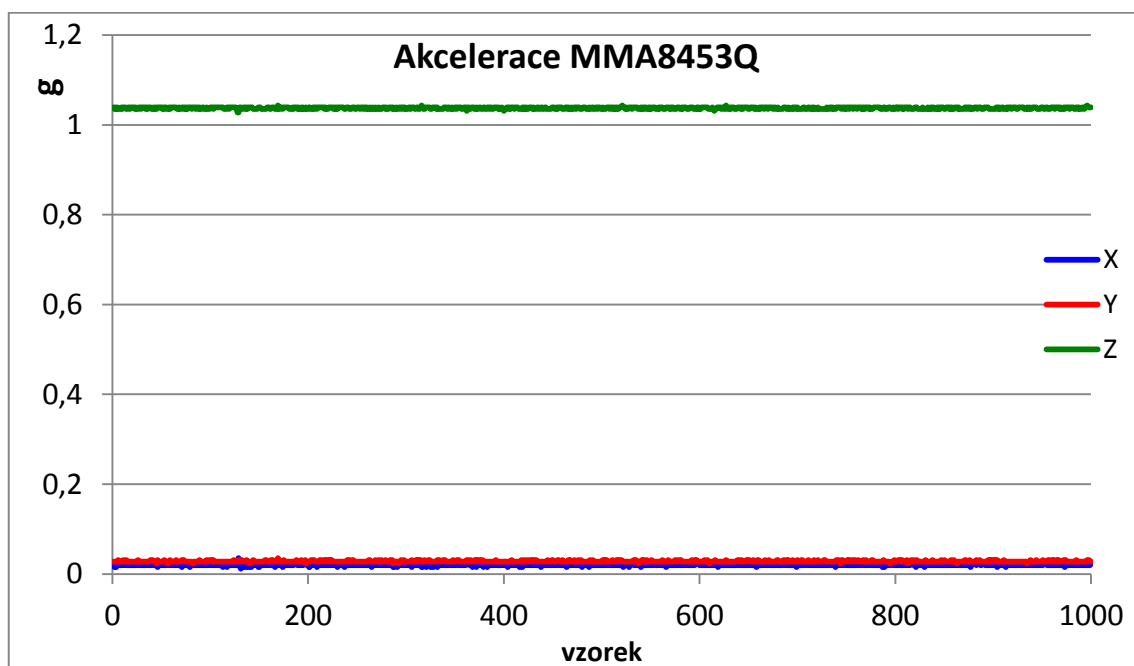
Obrázek 36: Obraz DPS s použitím LSM330DL

2.1.3 Porovnání obou obvodů

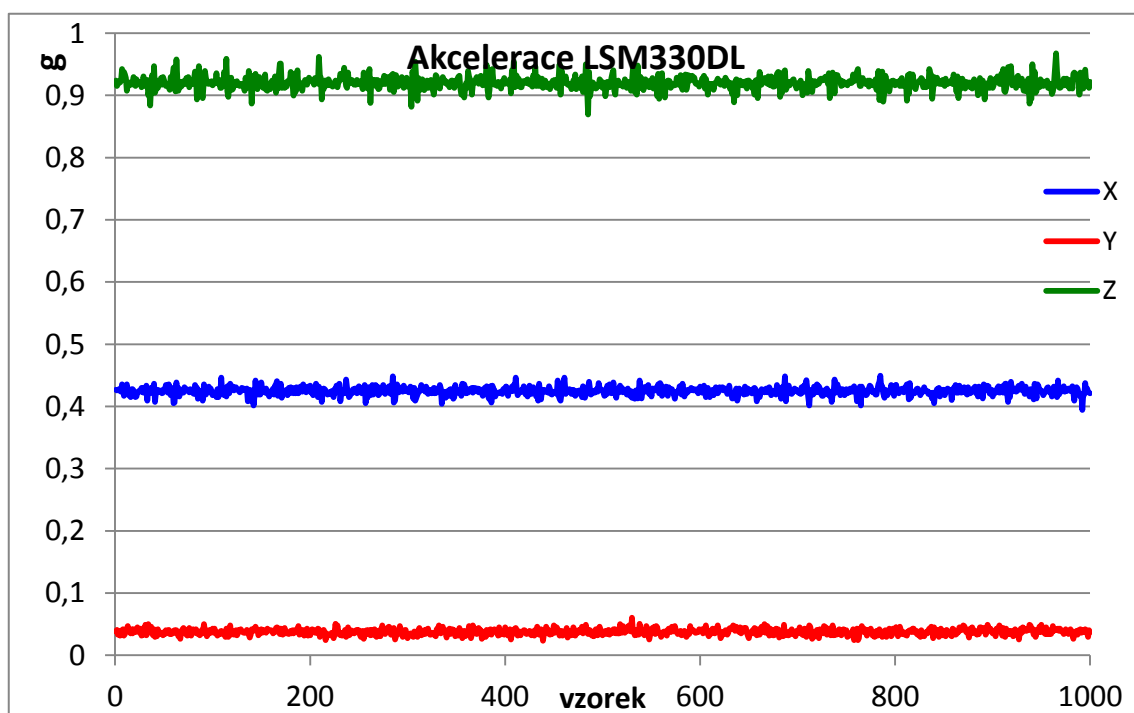
	MMA8453Q a L3G4200D	LSM330DL
Spotřeba (celého obvodu)	136,24 mA	32,62 mA
Měřicí rozsah pro akceleraci	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
Měřicí rozsah úhlové rychlosti	250/500/2000 dps	$\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps
Bitové rozlišení akcelerace	10 bit	16 bit
Bitové rozlišení rotace	16 bit	16 bit
Rychlost aktualizace dat na výstupu	800 Hz	400 Hz
Maximální rychlost sběrnice I ² C	400 kHz	400 kHz
Finanční náklady na kompletní desku	cca 650Kč	cca 600 Kč

Tabulka 2: Porovnání obvodů

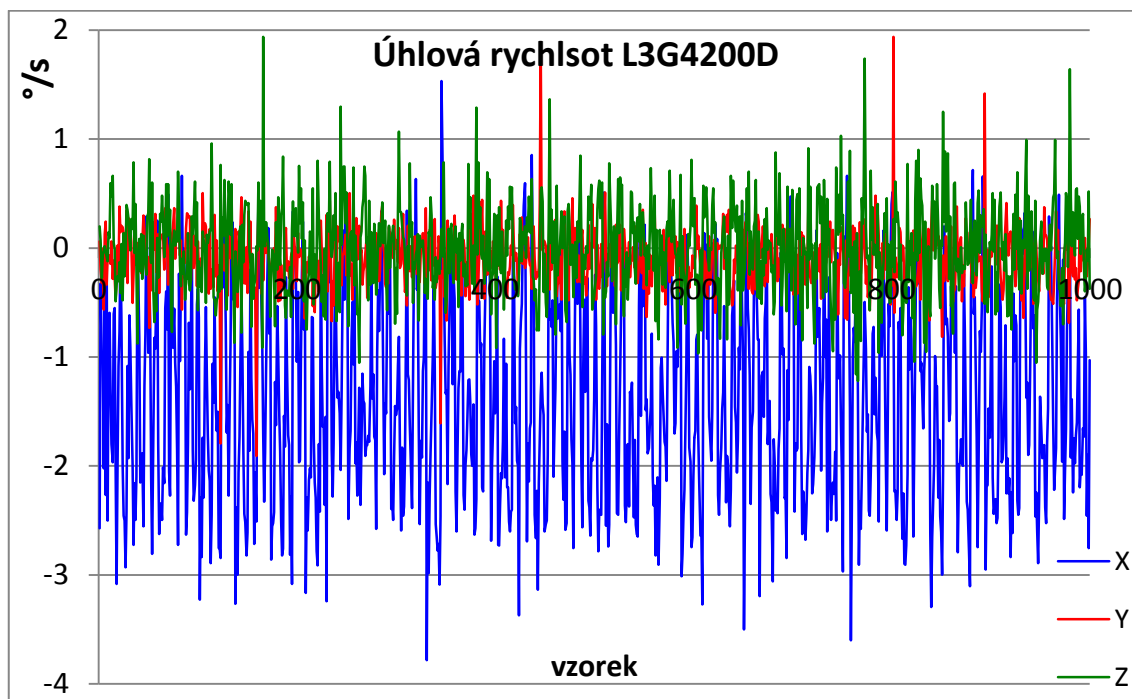
Následující grafy zobrazují 1000 vzorků (5 sekund) záznamu z obou senzorů. Data jsou naměřena v klidu v poloze, kdy je osa Z kolmá k zemi. V této poloze by měla být akcelerace $a(X) = a(Y) = 0$ g a $a(Z) = 1$ g a úhlová rychlost by měla být $\omega(X) = \omega(Y) = \omega(Z) = 0$.



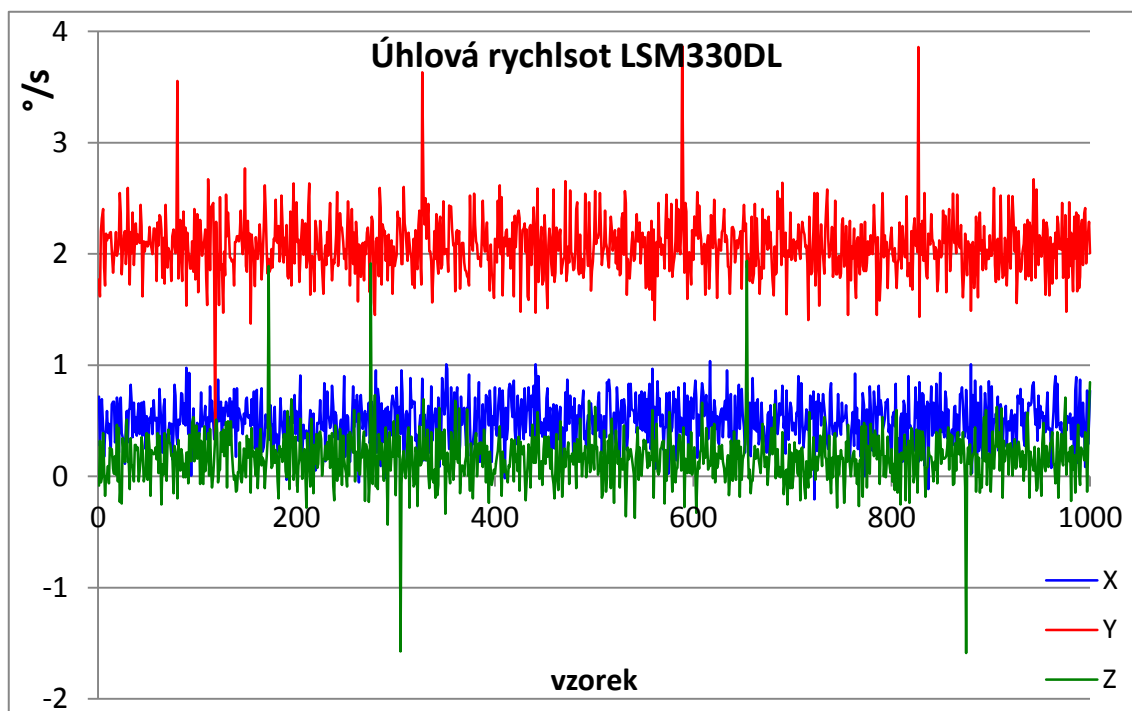
Graf 3: Akcelpace MMA8453Q



Graf 4: Akcelpace LSM330DL



Graf 5: Úhlová rychlost L3G4200D



Graf 6: Úhlová rychlost LSM330DL

Z grafů vyplývá, že obvod MMA8453Q má oproti akcelerometrické části obvodu LSM330DL menší odchylku dat, která je u LSM330DL v ose X dokonce 0,425 g. Obvod akcelerometr v obvodu LSM330DL také podléhá většímu šumu.

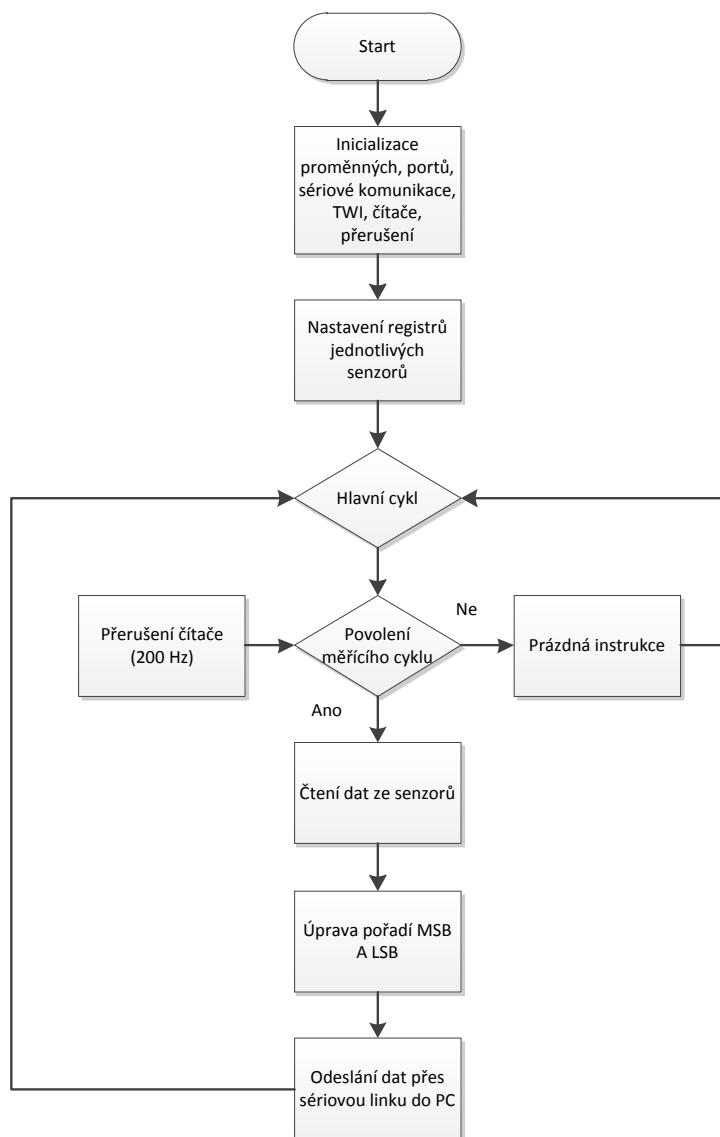
Ve srovnání gyroskopů L3G4200D a LSM330DL jsou čipy srovnatelné. L3G4200D trpí větším šumem, LSM330DL oproti tomu zase větší stálou odchylkou.

Následující tabulka zobrazuje medián a směrodatnou odchylku k datům zobrazeným v grafech (charakteristiky jsou vypočteny programem STATGRAPHICS Plus 5.0).

	akcelerace						úhlová rychlost					
	MMA8453Q			LSM330DL			L3G4200D			LSM330DL		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Medián	0,020	0,027	1,039	0,425	0,037	0,920	- 1,469	- 0,084	0,000	0,504	2,068	0,160
Směrodatná odchylka	0,002	0,002	0,002	0,007	0,005	0,010	0,952	0,267	0,410	0,201	0,267	0,230

Tabulka 3: Explorační analýza měřených signálů v klidu

2.2 Programování komunikace mezi senzory, mikrokontrolérem a PC



Obrázek 37: Vývojový diagram hlavní struktury programu v mikrokontroléru

V hlavní struktuře programu dochází po zapnutí napájení nejdříve k inicializaci proměnných, sériového portu, komunikace po TWI (I^2C), portů, čítače, povolení přerušení a do všech tří senzorů jsou přes sběrnici TWI nahrány hodnoty programovatelných registrů. Dále program přechází v nekonečnou smyčku vytvořenou pomocí funkce WHILE, ve které se nachází

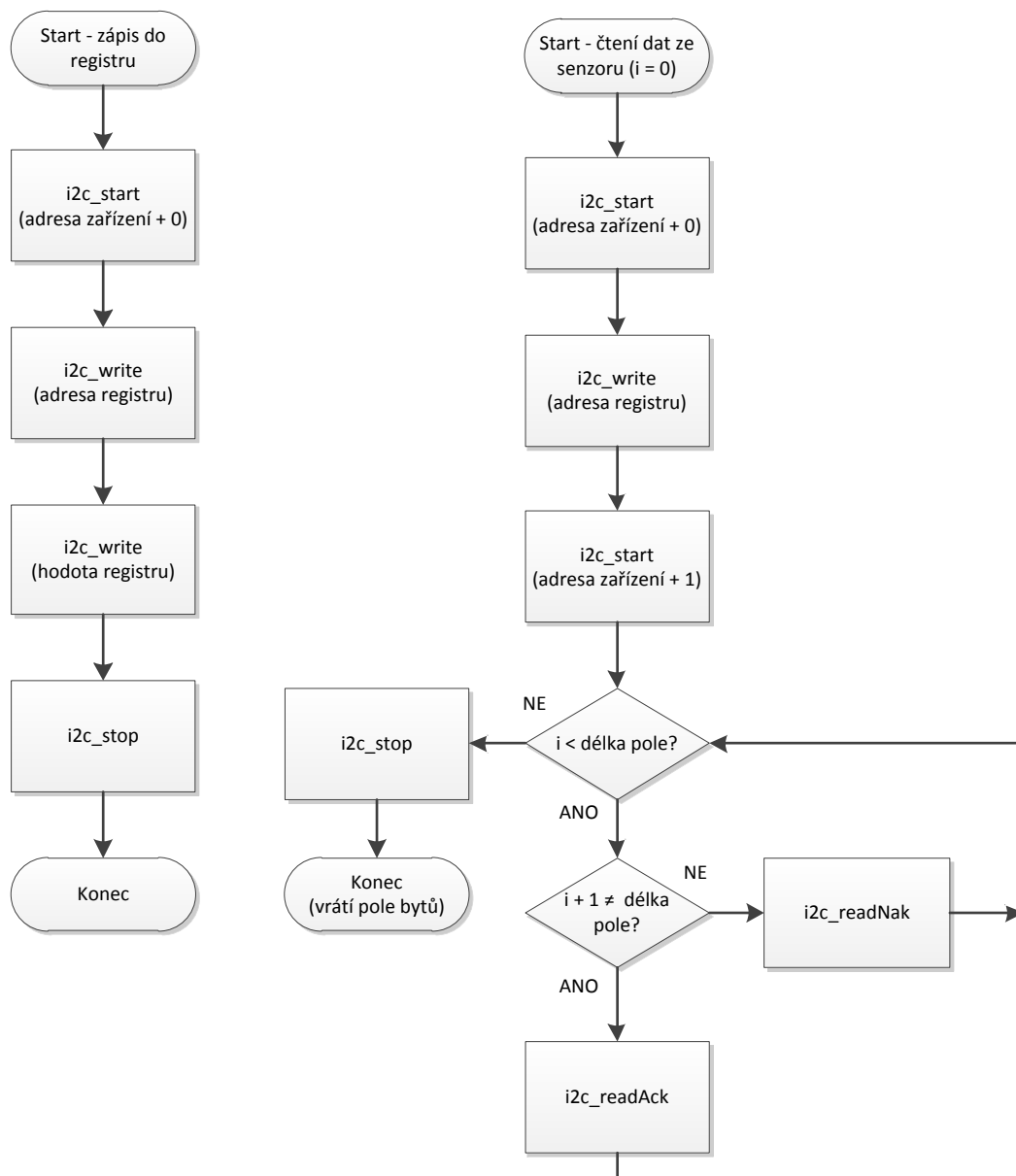
podmínka typu IF, pokud nedojde k přerušení čítače, provádí opakovaně jen prázdnou instrukci. Pokud ale dojde k přerušení čítače, je hodnota proměnné použité k časové synchronizaci nastavena z hodnoty 0 do hodnoty 1. To vyvolá povolení podmínky, ve které se nachází měřící sekvence. Ta sestává z načtení dat ze senzoru, přeskupení bytů MSB (Most significant bit) a LSB (Least significant bit) do pořadí MSB jako první a LSB jako druhý, protože některé ze senzorů tyto byty při odesílání dat vysílají v opačném pořadí, ale pro správnou rekonstrukci v PC, kde dochází ke spojení těchto dvojic uint8 do int16, je potřeba dodržet, aby byl byte s vyšší váhou (MSB) vyslán před nižším bytem LSB. Dále je zkonstruován komunikační paket a ten je vyslán přes rozhraní UART. Každý stý průchod těla podmínky jsou přepnuty dvě LED diody na portu mikrokontroléru, které slouží jako indikace správného běhu programu. Jako poslední instrukce v těle podmínky je nastavena časově synchronizační proměnná do hodnoty 0, ve které setrvá až do dalšího přerušení čítače.

Samotná komunikace přes sběrnici I²C je řízena, podle internetových odkazů zřejmě nejčastěji používanou, freeware knihovnou I2C Master Interface z produkce Petera Fleuryho. Z této knihovny využívám zejména funkce `i2c_init`, `i2c_start`, `i2c_write`, `i2c_stop`, `i2c_readNak`, `i2c_readAck` a `i2c_readNak`, podrobnější popis jednotlivých funkcí je v následující tabulce.

<code>i2c_init</code>	Inicializace všech funkcí mikrokontroléru potřebných ke správné funkci TWI, nastavení prescaleru pro určení frekvence hodinového signálu na pinu SCL, která lze označit za přenosovou rychlost komunikace (v mém případě 400 kHz). K TWI komunikaci je na ATMEGA16 použit port C (C0 pro SDA a C1 pro SCL).
<code>i2c_start</code>	Tato funkce zahajuje komunikaci. Vkládají se do ní dvě hodnoty a to sedmi bitová adresa cílového slave zařízení a bit <code>I2C_WRITE</code> nebo <code>I2C_READ</code> určující směr následného přenosu (1 – zápis, 0 – čtení).
<code>i2c_write</code>	Funkce zajišťující zápis bytu do slave zařízení, tuto funkci je možno řetězit pro zápis více hodnot (například při nastavení registrů. Kdy je nejdříve zapsána adresa registru a pak jeho hodnota). Pro ukončení zápisu a komunikace je použita funkce <code>i2c_stop</code> .
<code>i2c_readNak</code>	Čtení bytu ze slave zařízení, tato funkce se používá pro čtení jednoho bytu, nebo posledního bytu načítaného pole, musí být následována funkcí <code>i2c_stop</code> .
<code>i2c_readAck</code>	Obdobně jako <code>i2c_readNak</code> je tato funkce určena ke čtení, ale ne jednoho samostatného bytu, ale pole bytů. Pro poslední prvek pole je pak použita funkce <code>i2c_readNak</code> , následována <code>i2c_stop</code> .
<code>i2c_stop</code>	Příkaz ukončující komunikaci.

Tabulka 4: Popis funkcí z I2C Master Interface

Tyto funkce používám ke dvěma účelům, zápis do registru nastavení senzorů a pro čtení dat ze senzorů.



Obrázek 38: Zápis do registru senzoru - vlevo / čtení dat ze senzoru – vpravo

Pro načtení dat jsou data uspořádaný do paketu o délce 20 bytů, který je dán následující strukturou.

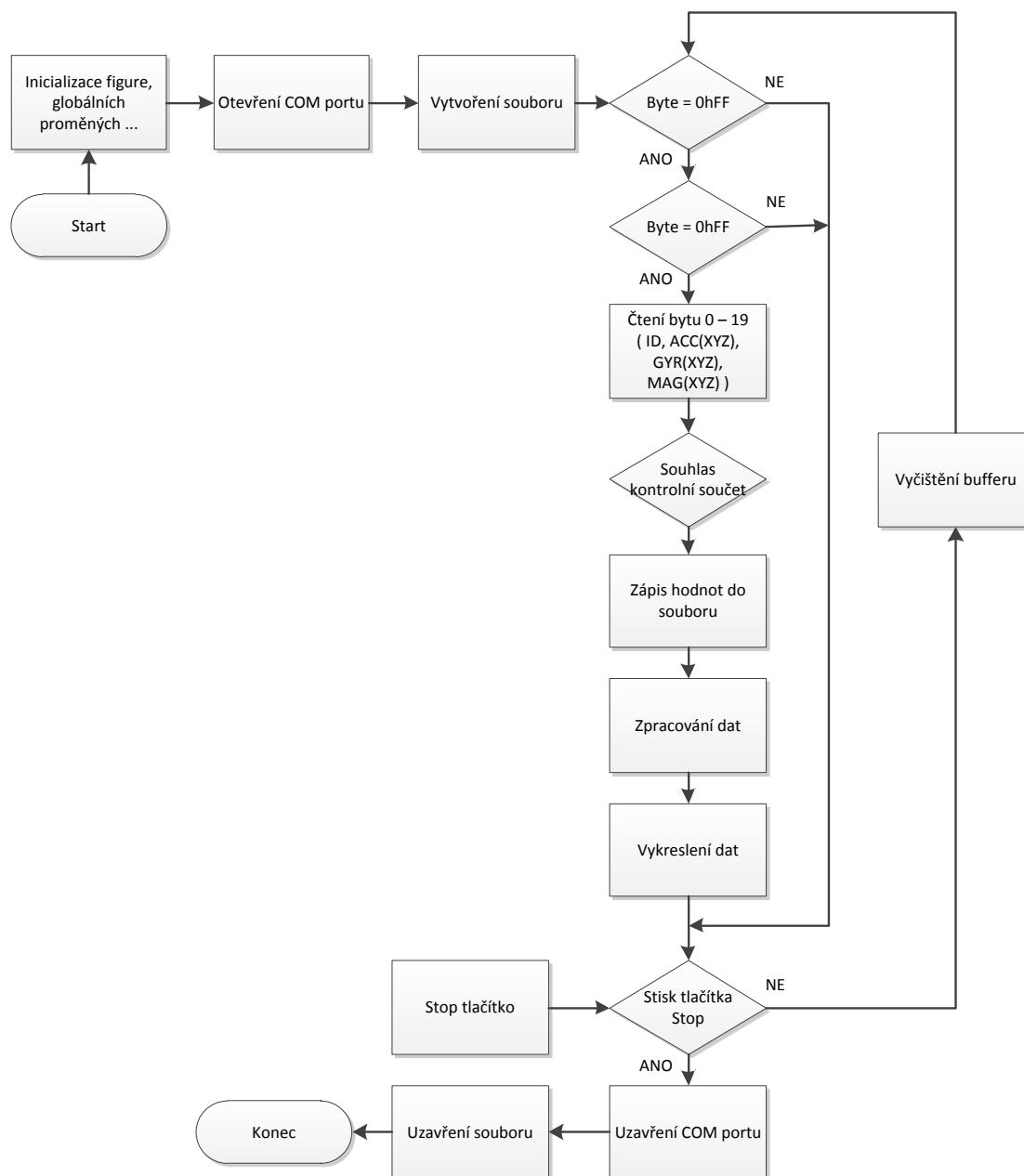
21	20	19	18	17	16	15	14	
0hFF	0hFF	ID	ACCX MSB	ACCX LSB	ACCY MSB	ACCY LSB	ACCZ MSB	...
13	12	11	10	9	8	7	6	
ACCZ LSB	GYRX MSB	GYRX LSB	GYRY MSB	GYRY LSB	GYRZ MSB	GYRZ LSB	MAGX MSB	...
5	4	3	2	1	0			
MAGX LSB	MAGY MSB	MAGY LSB	MAGZ MSB	MAGZ LSB	Σ			

Tabulka 5: Uspořádání datového paketu odesílaného do PC

Byty 19 a 20 o pevné hexadecimální hodnotě FF fungují jako synchronizační značka, dále následuje identifikátor ID (nabývá hodnoty 1 až 100) a pak data z akcelerometru, nejdříve horní byte (ACCX MSB) a dolní byte (ACCX LSB), dále následují ve stejném způsobu osy Y, Z a data z gyroskopu a kompasu. Jako poslední byte (0) je odeslán byte Σ - kontrolní součet, který zajišťuje správnost přijatého paketu v PC.

[31]

2.3 Programování v prostředí MTLAB v PC



Obrázek 39: Vývojový diagram vizualizačního programu pomocí MATLABu

Po inicializaci globálních proměnných a rozložení ovládacích prvků okna, jsou zjištěny dostupné porty COM, ze kterých si uživatel vybere ten, na kterém je připojeno měřící zařízení. Následně je vytvořen soubor txt, který je pojmenovaný podle aktuálního data a času ve tvaru dd.mm.rr-HH-MM.txt. Následně se pomocí dvou podmínek IF čeká na příchod dvou po sobě jdoucích synchronizačních bytů 0hFF. Až obě podmínky projdou, jsou načteny ostatní datové byty, ze kterých je vytvořen součet, ten je následně porovnám s hodnotou kontrolního součtu na konci paketu.

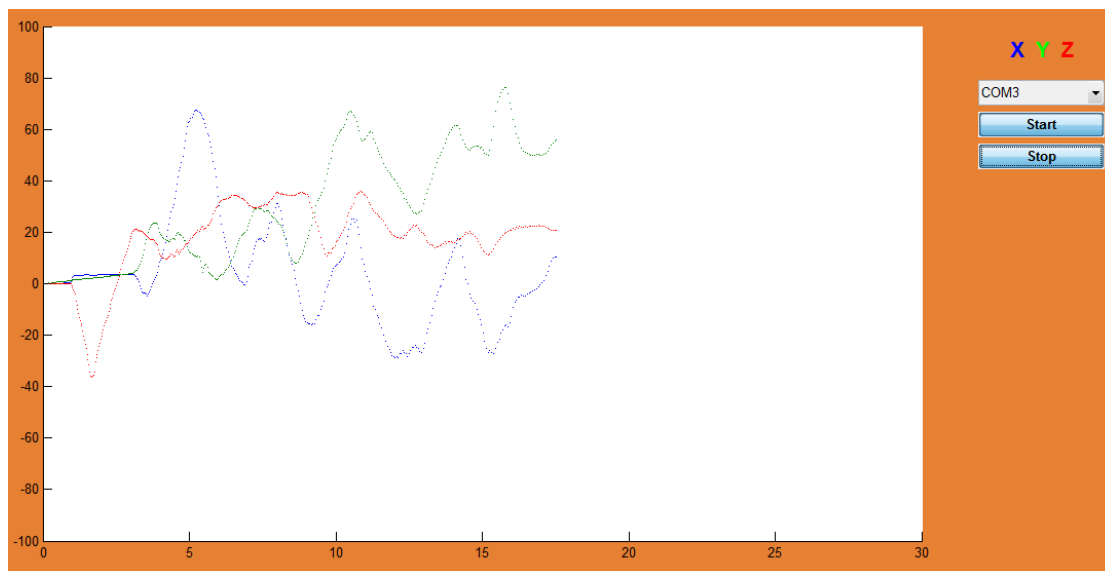
Dále v bloku zpracování dat je vytvořen časový vektor, který je závislý na periodě vzorkování a ID vzorku (počtu vynechaných vzorků).

Data z jednotlivých senzorů jsou pomocí vzorců pro přepočítání z akcelerace na rychlost a polohu a z úhlové rychlosti na úhlovou výchylku.

Tyto data jsou uložena do souboru ve formátu ASCII, jako tabulka, kde jsou jednotlivé sloupce oddělené tabulátory.

Dále jsou data vykresleny do grafů, u kterých se automaticky aktualizuje časová osa, tak, aby bylo stále vykresleno 30 sekund záznamu.

Cyklus je ukončen, pokud bylo zmáčknuto tlačítko Stop, pokud ne dále pokračuje vymazáním bufferu sériového portu (vymazání dat, která MATLAB nestihl zpracovat) a jeho opakováním. Pokud bylo zmáčknuto tlačítko Stop je port COM a soubor *.txt uzavřen.



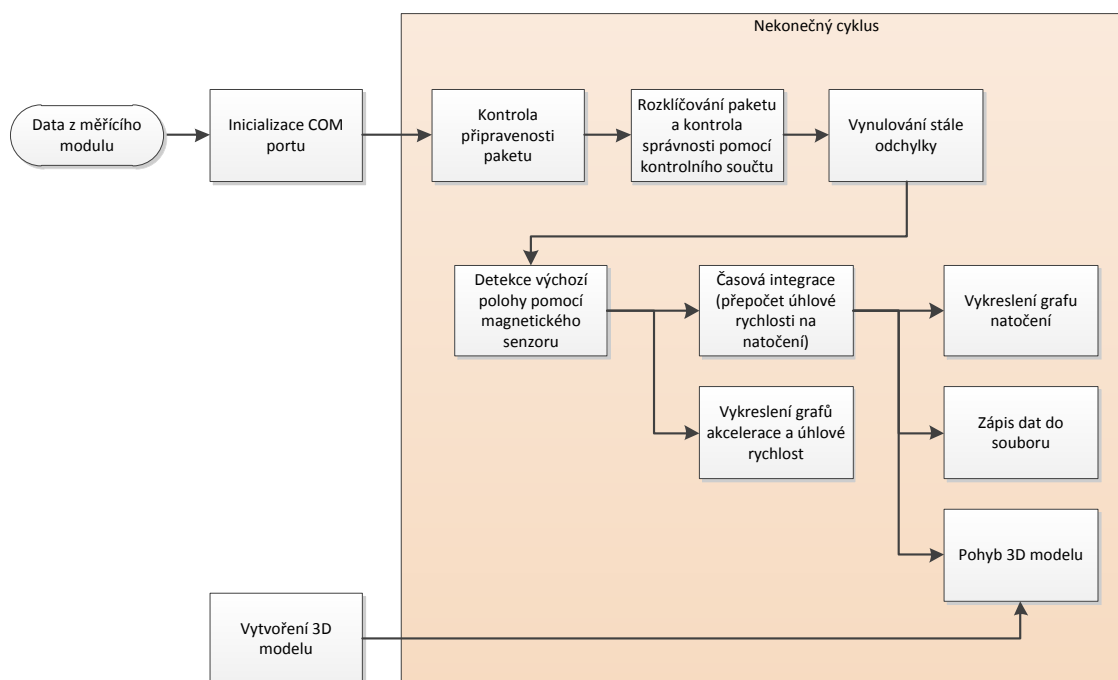
Obrázek 40: Okno aplikace v MATLABu

Program v MATLABu 2012a byl vytvořen zejména pro testování senzorů, protože během jeho používání bylo zjištěno, že je jeho rychlost zpracování při real-timeovém vykreslování dat

nedostačující pro reálné použití. Počet vynechaných paketů, při vzorkovací frekvenci 200 Hz je průměrně 10. Což znamená, že se reálná vzorkovací frekvence snížila na přibližně 20 Hz. MATLAB lze použít jedině bez grafického výstupu pro prosté čtení dat vysílaných senzorem a jejich zápis do souboru, kde se počet vynechaných paketů pohybuje mezi dvěma až třemi. Případně by mohla pomoci kompilace do samospustitelného souboru exe. Pro další postup bylo zvoleno použití programu firmy National Instruments LabVIEW 2011.

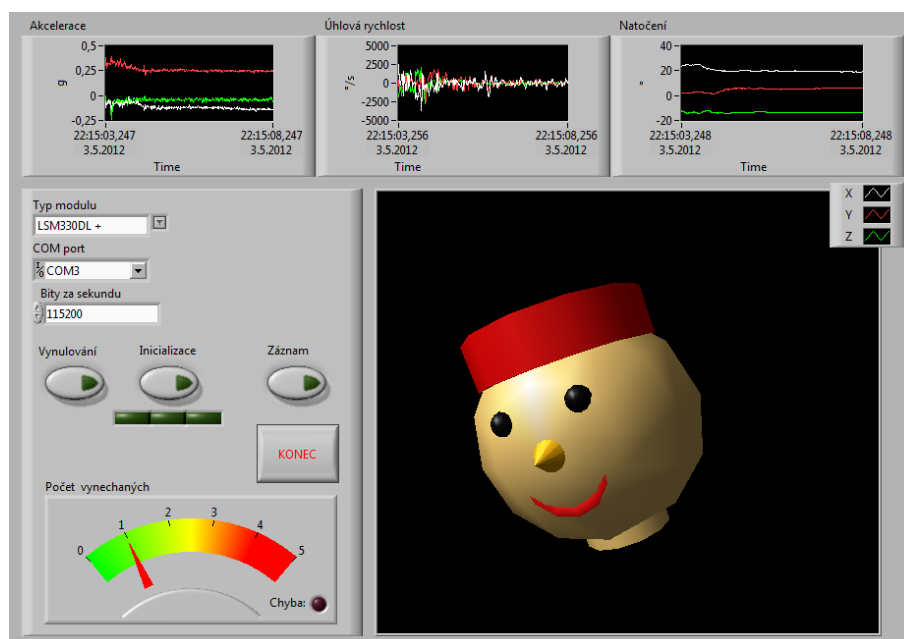
2.4 Programování v prostředí LABVIEW v PC

Nejdříve byl program vytvořen pro práci s jedním senzorem, aby byla otestována funkce programu LabVIEW 2011 x32 oproti programu MATLAB 2012a x64.



Obrázek 41: Blokové schéma programu v prostředí LabVIEW pro jeden senzorický modul

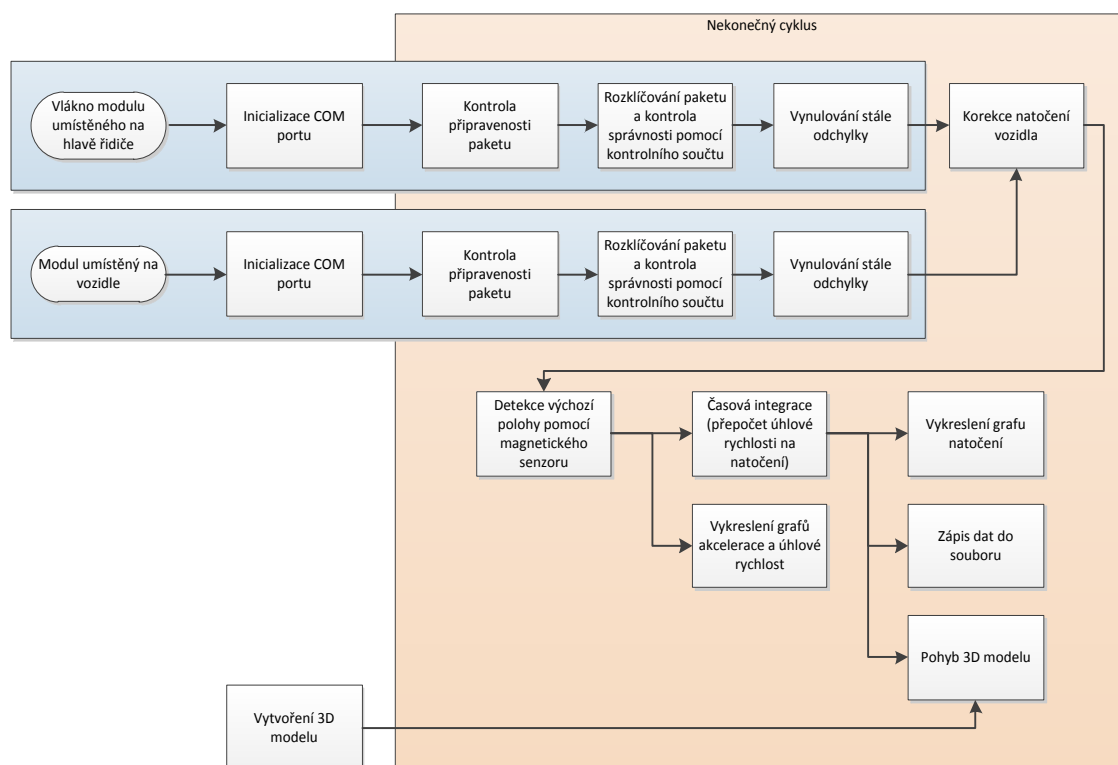
Program je vytvořen jako FPGA projekt, základem je čtení sériového portu, dále následuje rozklad paketu a jeho ověření kontrolním součtem. Již během tohoto procesu jsou vykreslována data pro ověření správné funkce programu.



Obrázek 42: Pření panel zkušebního programu

Po stisku tlačítka Vynulování dojde k vynulování všech os akcelerometru a gyroskopu. Stiskem tlačítka Inicializace si měřící smyčka zapamatuje aktuální hodnotu vnějšího magnetického pole, která je použita jako referenční nulový bod. Při každém průchodu modulu tímto bodem, jsou signály vzniklé integrací původních hodnot resetovány, to je potřeba kvůli odchylkám vzniklých přirozenými drifty senzorů a dalšími vlivy, jako vzorkování, kvantování atd. Přiblížení k nulovému bodu je indikováno třemi „diodami“ pod tlačítkem Inicializace. Signály akcelerace a úhlové rychlosti jsou vykresleny v grafech v horní části obrazovky, dále je zde po první integraci v čase vykreslena i aktuální výchylka ve všech třech osách. Tato hodnota výchylky je použita k natočení 3D modelu, který reprezentuje pohyb hlavy řidiče. Ta se pohybuje simultánně s pohybem hlavy řidiče ve všech třech měřených osách, přičemž jako osa rotace je použit bod na spodní části hlavy (aproximace stupňů volnosti krční páteře do jednoho bodu). Po stisku Záznam jsou naměřená data zaznamenávána do souboru txt ve formě tabulky.

Na tomto programu byla otestována rychlost aplikace, kdy dochází k vynechávání maximálně jednoho až dvou paketů (při 200 Hz vzorkovací frekvenci), což je mnohem lepší výsledek než u MATLABu. Množství vynechaných paketů v reálním čase během měření zobrazuje ručkový přístroj pod ovládacími prvky. Dioda Chyba se rozsvítí v případě přijetí chybného paketu. Další výhodou LabVIEW je funkce samotného čtení sériového portu, kdy je LabView schopno samo určit kde začíná a končí datový paket a není potřeba dalších bloků, které by hledaly jeho začátek, nicméně pro zajištění bezchybnosti dat byla zachována funkce kontrolního součtu.



Obrázek 43: Blokové schéma programu v prostředí LabVIEW

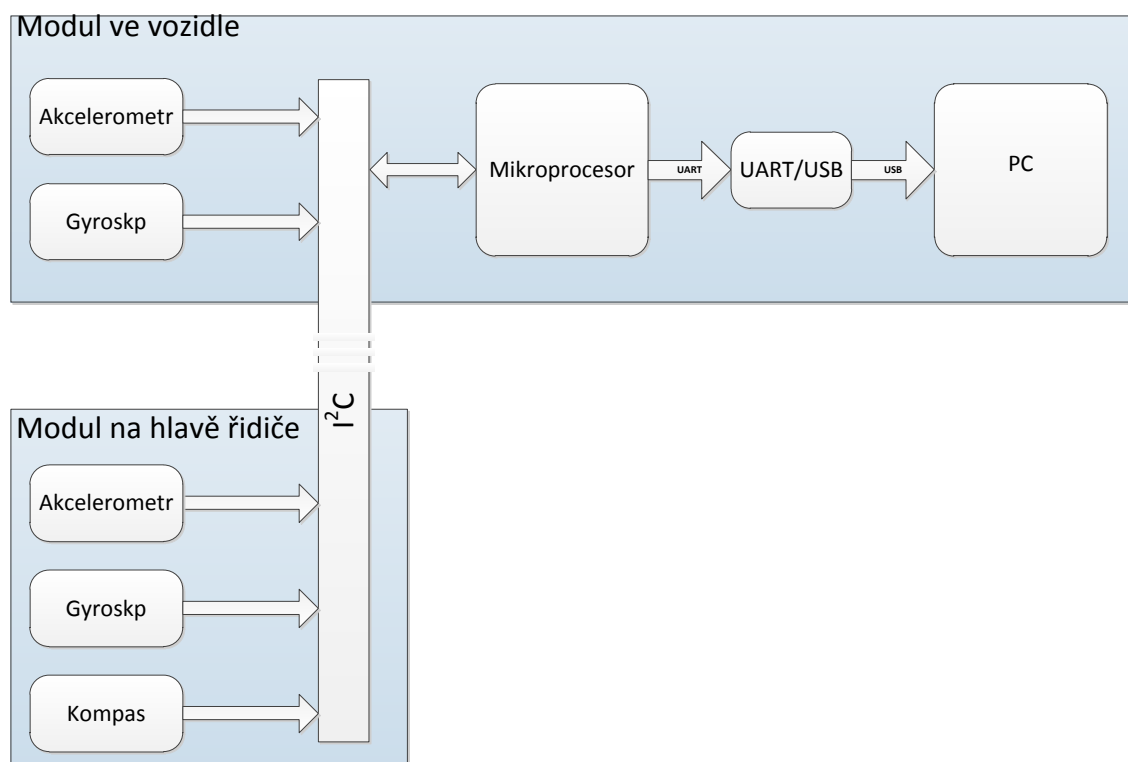
Program pro měření polohy hlavy bez vlivu natočení vozidla je zobrazen výše. Je to v podstatě původní program doplněný o další sériový kanál, na který je připojen senzor snímající změnu polohy vozidla. Ta je odečtena od dat z modulu umístěného na hlavě řidiče.

Nevýhodou tohoto řešení je zvýšené zatížení hardware při obsluze dvou sériových portů, což se projevuje na rychlosti programu. Proto byla vytvořena upravená koncepce.

3 Úprava měřicího řetězce

Důvodem pro použití dvou sérových portů byl fakt, že senzor magnetického pole HMC5883L na rozdíl od ostatních použitých senzorů nepodporuje výběr adresy senzoru, který se provádí změnou napěťové úrovně na k tomu určeném pinu.

Po uvážení toho, že není potřeba snímat polohu vozidla vzhledem k magnetickému poli Země, byla možnost vypustit tento přebytečný senzor z desky modulu umístěného ve vozidle. Proto byla změněna koncepce měřicího řetězce, kdy jeden mikrokontrolér obsluhuje jak skupinu senzorů (akcelerometr, gyroskop, magnetický senzor) na hlavě řidiče, tak skupinu senzorů snímající pohyb samotného automobilu (akcelerometr a gyroskop). K tomuto účelu byla upravena deska jednoho z modulů tak, že se senzor magnetismu odpojí od napájení, čímž byl vyřazen z provozu, přebytečný mikroprocesor, napájecí obvod a převodník UART/USB byl vyřazen jednoduše přepnutím spínače.



Obrázek 44: Blokové schéma upraveného měřicího řetězce

3.1 Úprava programu v mikrokontroléru

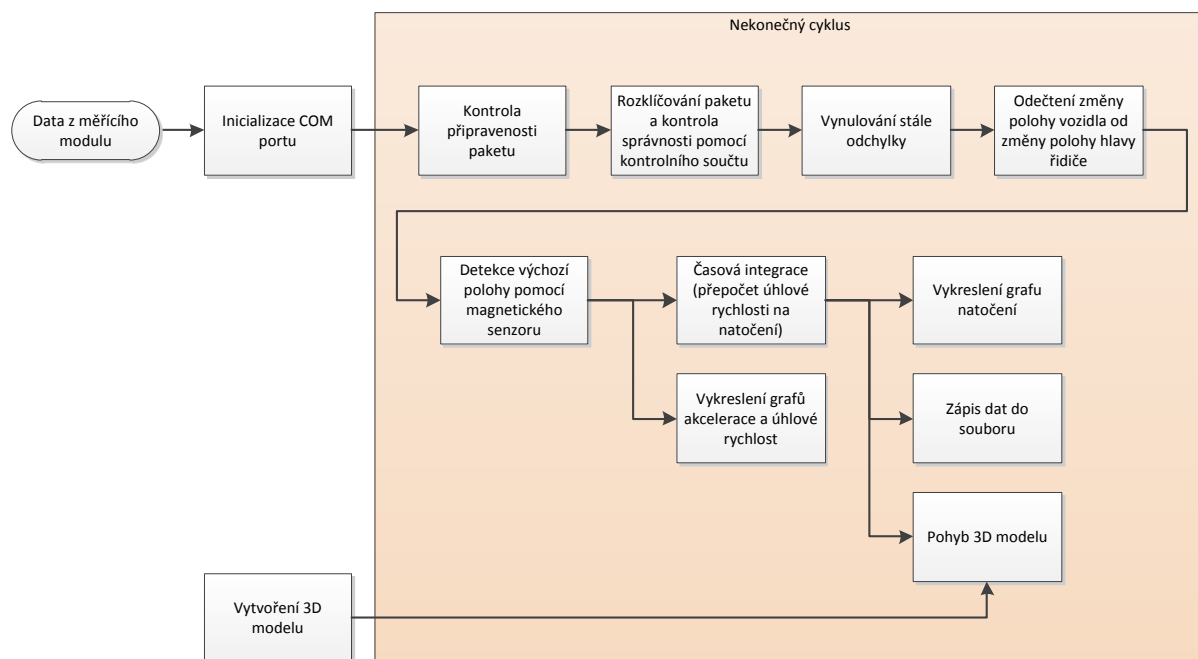
Hlavním změnou v programu řídicího mikrokontroléru je přidání obsluhy dalších dvou senzorů (akcelerometru a gyroskopu) s novými adresami.

Tato úprava vede logicky k následující úpravě složení datového paketu.

33	32	31	30	29	28	27	26	
0hFF	0hFF	ID	ACC1X MSB	ACC1X LSB	ACC1Y MSB	ACC1Y LSB	ACC1Z MSB	...
25	24	23	22	21	20	19	18	
ACC1Z LSB	GYR1X MSB	GYR1X LSB	GYR1Y MSB	GYR1Y LSB	GYR1Z MSB	GYR1Z LSB	MAG1X MSB	...
17	16	15	14	13	12	11	10	
MAG1X LSB	MAG1Y MSB	MAG1Y LSB	MAG1Z MSB	MAG1Z LSB	ACC2X MSB	ACC2X LSB	ACC2Y MSB	...
9	8	7	6	5	4	3	2	
ACC2Y LSB	ACC2Z MSB	ACC2Z LSB	GYR2X MSB	GYR2X LSB	GYR2Y MSB	GYR2Y LSB	GYR2Z MSB	...
1	0							
GYR1Z LSB	Σ							

Tabulka 6: Složení datového paketu (byty 1 – senzory ve vozidle, byty 2 – senzory na hlavě řidiče)

3.2 Úprava programu v LabVIEW

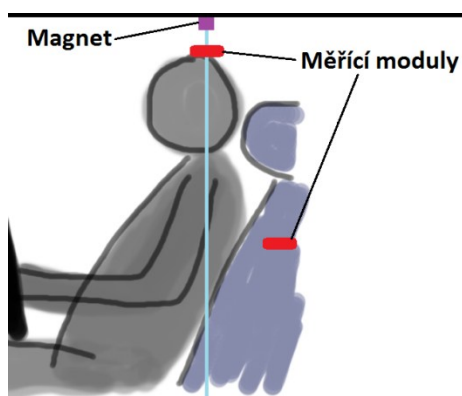


Obrázek 45: Upravený program v LabVIEW

Hlavní změnou prošel blok rozklíčování paketu, do kterého byly přidány údaje o datech ze dvou nových senzorů. Samozřejmě byla odebrána větev druhého sériového portu. Ovládací panel zůstal beze změn.

3.3 Uspořádání měřících modulů

Jak již bylo zmíněno výše, senzorický modul měřící pohyb automobilu je pevně umístěn v automobilu, například zastavěn do sedadla automobilu. Modul snímající pohyb hlavy řidiče (nebo jiného člena posádky) je připevněn na horní část helmy (nebo může být vestavěn do horní části výstelky helmy). Důležité je však, aby byla dodržena pozice vertikálně nad osou krční páteře. Nad tímto místem je pod střechou vozidla umístěn permanentní magnet, ten musí být v dostatečné vzdálenosti, aby vliv jeho magnetického pole působícího na senzor v hlavovém modulu byl znatelně větší než přirozené magnetické pole Země.



Obrázek 46: Umístění senzorů

4 Závěr

Zadáním této diplomové práce bylo navrhnout a uvést v činnost zařízení, které by bylo v reálném čase schopno měřit a zobrazovat pohyb hlavy řidiče vozidla během jízdy. Tato práce řešila celkovou problematiku snímání, přenosu a zobrazení dat. Úkolem bylo vytvořit jak měřicí hardware, tak software, který zpracovává naměřená data a v reálném čase je zobrazuje a zapisuje do souboru pro možnost archivace a dalšího pozdějšího zpracování.

Nejdříve byly vytvořeny dva měřicí moduly. Modul umístěný na hlavě (helmě) řidiče, který snímá pohyb hlavy jako takové a referenční modul, umístěný v automobilu, který snímá pohyb vozu při jízdě tak, aby bylo možné pomocí tříosého gyroskopického senzoru měřit naklánění samotné hlavy. Dále modul umístěný na hlavě obsahuje magnetický senzor pro účely automatické rekalibrace v nulové (výchozí) poloze a v obou je umístěn akcelerometr pro záznam vibrací a přetížení působící na hlavu, krční svalstvo, páteř a celé vozidlo. Pro tyto účely bylo nutno nejdříve nastudovat a dále v mikrokontroléru zprovoznit komunikaci přes sběrnici I²C, kterou tyto senzory využívají a dále využít komunikaci přes asynchronní mód sběrnice USART pro přesun dat z mikrokontroléru do PC.

Následně bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v prostředí LabVIEW, které má za úkol sbírat data z obou modulů, zpracovat je, zobrazit a uložit pro případné další pozdější využití. To vše pokud možno co nejrychleji v reálném čase. Výhoda prostředí LabVIEW je, že v něm lze vytvořený projekt kompilovat do samospustitelného souboru exe, ten však potřebuje run-time knihovny o velikosti okolo 200 MB, které jsou však volně stažitelné z webu společnosti National Instruments.

Naměřená data by měla být využité zejména pro návrh bezpečnostních prvků, či snímání aktivity a koncentrace řidiče během jízdy.

Moduly zařízení byly navrženy tak, aby bylo možno celý měřicí systém dále rozšířit o další senzory využívající komunikaci po I²C, které by snímali další zajímavé údaje o posádce během jízdy, jako je frekvence srdeční činnosti, EKG, teplota těla, nasycení krve kyslíkem, krevní tlak a další. Případně rozšíření z hlediska počtu modulů pro snímání pohybu dalších částí těla

5 Použitá literatura

- [1] T. M. HOANG, Systém pro automatickou detekci převrnutí invalidního vozíku, Ostrava: Diplomová práce na VŠB-TUO, 2009.
- [2] K. KRIEGELOVÁ, Měření vibrací při zpracování krevních derivátů, Ostrava: Diplomová práce na VŠB-TUO, 2007.
- [3] „Model 12M1B Piezoelectric Accelerometer from Endevco Corporation,“ [Online]. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [4] „R&D,“ [Online]. Available: <http://www.chaehoi.com/R-D>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [5] M. HUSÁK, „8. Akcelerometry,“ ČVUT VEL Praha, [Online]. Available: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [6] „MEMS,“ 9 Duben 2012. [Online]. Available: <http://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [7] Freescale Semiconductor, „MMA8453Q,“ Srpen 2011. [Online]. Available: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8450Q.pdf?pspl=1. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [8] . D. PIYABONGKARN, A. S. SEZEN, R. RAJAMANI a B. NELSON, „Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement,“ [Online]. Available: <http://www.me.umn.edu/labs/advcontrols/gyroscope.html>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [9] A. VOJÁČEK, „Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS,“ [Online]. Available: <http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/gyroskopy.htm>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [10] „Kapacitní gyroskop,“ 10 Září 2010. [Online]. Available: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kapacitní_gyroskop. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [11] STMicroelectronics, „L3G4200D,“ Prosinec 2010. [Online]. Available:

- http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00265057.pdf. [Přístup získán 30 Duben 2012].
- [12] STMicroelectronics, „MEMS Products Available in the Market,“ 09 Prosinec 2011. [Online]. Available: <http://info.coventor.com/mems-products/?Tag=ST%20Microelectronics>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [13] STMicroelectronics, „LSM330DL,“ Červen 2011. [Online]. Available: http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/DM00034579.pdf. [Přístup získán 30 Duben 2012].
- [14] M. HUSÁK, „6. Senzory magnetických veličin,“ [Online]. Available: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/06%20Magneticke%20veliciny.pdf>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [15] M. ADÁMEK, „Hallový senzory,“ [Online]. Available: http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s_5_2.htm. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [16] „Snímače polohy,“ [Online]. Available: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20polohy%20magneticke.pdf>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [17] „Speciální diody 2,“ [Online]. Available: <http://www.svetelektrotechniky.ic.cz/specialni%20diody%202.html>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [18] J. SEDLÁK, „Nejdůležitější elektronické součástky II,“ 23 Květen 2003. [Online]. Available: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2003052314>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [19] [Online]. Available: <http://htmlimg4.scribdassets.com/1sb6chrcow10f6dd/images/107-5aa606e0c3.jpg>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [20] „SQUID,“ 3 Srpen 2011. [Online]. Available: <http://cs.wikipedia.org/wiki/SQUID>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [21] „Josephsonův jev,“ 27 Duben 2012. [Online]. Available: http://cs.wikipedia.org/wiki/Josephsonův_jev. [Přístup získán 30 Duben 2012].
- [22] Honeywell International Inc., „HMC5883L,“ Duben 2012. [Online]. Available: <http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog->

- documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf.
[Přístup získán 30 Duben 2012].
- [23] WinAVR, „Intro to ATMEL AVR,“ 8 Srpen 2006. [Online]. Available: <http://winavr.scienceprog.com/general-avr/intro-to-atmel-avr.html>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [24] Atmel, „ATmega16(L) Complete,“ Červenec 2010. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>. [Přístup získán 30 Duben 2012].
- [25] P. TIŠNOVSKÝ, „Externí sériové sběrnice SPI a I²C,“ 30 12 2008. [Online]. Available: <http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [26] „I²C,“ 5 Březen 2012. [Online]. Available: [http://cs.wikipedia.org/wiki/I²C](http://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2). [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [27] „I²C,“ 16 Únor 2012. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/I²C](http://en.wikipedia.org/wiki/I%C2). [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [28] „USART,“ 20 Listopad 2011. [Online]. Available: <http://cs.wikipedia.org/wiki/USART>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [29] „Universal Serial Bus,“ 4 Březen 2012. [Online]. Available: http://cs.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [30] „National Semiconductor® USART,“ [Online]. Available: <http://www.ip-extreme.com/IP/usart.shtml>. [Přístup získán 15 Duben 2012].
- [31] P. FLEURY, „AVR-Software,“ [Online]. Available: <http://jump.to/fleury>.

Seznam příloh

- I. Hlavní soubor programu pro ATMEGA16
- II. Blokové schéma upraveného programu v LabVIEW

Na CD:

- III. Návrhy DPS obou modulů v prostředí Eagle
- IV. AVR projekt pro mikrokontrolér v modulech (LSM330DL)
- V. Soubor typu VI v prostředí LabVIEW
- VI. Spustitelný soubor EXE vytvořený v prostředí LabVIEW + Run-Time Engine 32bit
- VII. Přehled blokového schématu LabVIEW v html

I. Hlavní soubor programu pro ATMEGA16

```
#define F_CPU 16000000L
#include <stdlib.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <util/delay.h>
#include "i2cmaster.h"
#define nop() __asm__ __volatile__ ("nop")
#define ACC1_A 0x30
#define GYR1_A 0xD0
#define MAG1_A 0x3C
#define ACC2_A 0x32
#define GYR2_A 0xD2
uint8_t dataA1[6];
uint8_t dataG1[6];
uint8_t dataA2[6];
uint8_t dataG2[6];
uint8_t dataM1[6];
char data[34];
uint8_t ID = 1;
int i;
uint8_t povol = 0;
void USARTInit(uint16_t ubrr_value)
{
    UBRRL = ubrr_value;
    UBRRH = (ubrr_value>>8);
    UCSRC=(1<<URSEL) | (3<<UCSZ0);
    UCSRB=(1<<RXEN) | (1<<TXEN);
}
void USARTWriteChar(char data)
{
    while(!(UCSRA & (1<<UDRE)))
    {
    }
    UDR=data;
}
void writeI2Cbyte(uint8_t address, uint8_t location, uint8_t
value)
{
    i2c_start(address+I2C_WRITE);
    i2c_write(location);
    i2c_write(value);
    i2c_stop();
}
uint8_t readI2Cbyte(uint8_t address, uint8_t location)
{

```

```

        uint8_t value;
        i2c_start(address+I2C_WRITE);
        i2c_write(location);
        i2c_start(address+I2C_READ);
        value = i2c_readNak();
        i2c_stop();
        return value;
}
void readI2CbyteArray(uint8_t address, uint8_t location, uint8_t
*array,uint8_t size)
{
    i2c_start(address+I2C_WRITE);
    i2c_write(location);
    i2c_start(address+I2C_READ);
    int i=0;
    while(i<size)
    {
        if ((i+1)!=size)
            array[i]=i2c_readAck();
        else array[i]=i2c_readNak();
        i++;
    }
    i2c_stop();
}
int main( void )
{
    DDRA = 0xFF;
    PORTA = 0x0F;
    USARTInit(0x0008);
    i2c_init();
    _delay_ms(200);
    //INC ACC1 -----
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x20, 0b01100111); //CTRL_REG1_A
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x21, 0b00000000); //CTRL_REG2_A
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x22, 0b00000000); //CTRL_REG3_A
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x23, 0b11001000); //CTRL_REG4_A
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG5_A
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(ACC1_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG6_A
    _delay_ms(2);
    //INC GYR1 -----
    writeI2Cbyte(GYR1_A, 0x20, 0b01001111); //CTRL_REG2_G1
    _delay_ms(2);
    writeI2Cbyte(GYR1_A, 0x21, 0b00000000); //CTRL_REG2_G2
    _delay_ms(2);

```

```

writeI2Cbyte(GYR1_A, 0x22, 0b00000000); //CTRL_REG2_G3
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR1_A, 0x23, 0b11000000); //CTRL_REG2_G4
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR1_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG2_G5
_delay_ms(2);
//INC MAG1 -----
writeI2Cbyte(MAG1_A, 0x00, 0b01111000); //Configuration
Register A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(MAG1_A, 0x01, 0b00000000); //Configuration
Register B
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(MAG1_A, 0x02, 0b00000000); //Mode Register
_delay_ms(100);
//INC ACC2 -----
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x20, 0b01100111); //CTRL_REG1_A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x21, 0b00000000); //CTRL_REG2_A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x22, 0b00000000); //CTRL_REG3_A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x23, 0b11001000); //CTRL_REG4_A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG5_A
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(ACC2_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG6_A
_delay_ms(2);
//INC GYR1 -----
writeI2Cbyte(GYR2_A, 0x20, 0b01001111); //CTRL_REG2_G1
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR2_A, 0x21, 0b00000000); //CTRL_REG2_G2
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR2_A, 0x22, 0b00000000); //CTRL_REG2_G3
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR2_A, 0x23, 0b11000000); //CTRL_REG2_G4
_delay_ms(2);
writeI2Cbyte(GYR2_A, 0x24, 0b00000000); //CTRL_REG2_G5
_delay_ms(2);
//TIMER
TIMSK=(1<<TOIE0);
TCCR0 = (1<<CS02) | (0<<CS01) | (1<<CS00);
OCR0=0x4D; //0x26;
TCNT0=0xB2; //0xD9;
sei();
PORTA =~ PORTA;
while(1) // Infinite Loop -----
-----
{

```

```

if(povol==1)
{
    //ACC1 -----
    for (i = 0; i < 6; i++)
    {
        dataA1[i] = readI2Cbyte(ACC1_A,0x28+i);
    };
    //GYR1 -----
    for (i = 0; i < 6; i++)
    {
        dataG1[i] = readI2Cbyte(GYR1_A,0x28+i);
    };
    //MAG1 -----
    readI2CbyteArray(MAG1_A,0x03,(uint8_t
*)dataM1,1*6);
    //ACC2 -----
    for (i = 0; i < 6; i++)
    {
        dataA2[i] = readI2Cbyte(ACC2_A,0x28+i);
    };
    //GYR2 -----
    for (i = 0; i < 6; i++)
    {
        dataG2[i] = readI2Cbyte(GYR2_A,0x28+i);
    };
    for (i = 0; i < 3; i++)
    {
        data[i*2+3] = dataA1[i*2+0];
        data[i*2+4] = dataA1[i*2+1];
        data[i*2+9] = dataG1[i*2+0];
        data[i*2+10] = dataG1[i*2+1];
        data[i*2+15] = dataM1[i*2+0];
        data[i*2+16] = dataM1[i*2+1];
        data[i*2+21] = dataA2[i*2+0];
        data[i*2+22] = dataA2[i*2+1];
        data[i*2+27] = dataG2[i*2+0];
        data[i*2+28] = dataG2[i*2+1];
    };
    //send
    data[0] = 0xFF;
    data[1] = 0xFF;
    data[2] = ID;
    data[33] = 0x00;
    for (i = 0; i < 33; i++)
    {
        data[33] = data[33]+data[i];
        USARTWriteChar(data[i]);
    };
    USARTWriteChar(data[33]);
}

```

```

        if (ID==100)
        {
            ID=0;
            PORTA =~ PORTA;

        };
        ID++;
        povol=0;
    }
    else
    {
        nop();
    }
}
ISR(TIMER0_OVF_vect)
{
    OCR0=0x4D;
    TCNT0=0xB2;
    povol++;
}

```